



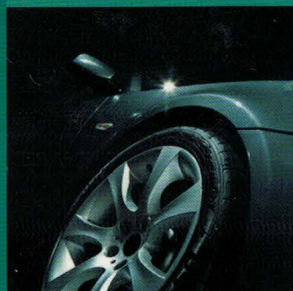
汽车先进技术译丛
新能源汽车系列

 Springer

混合动力汽车技术

Hybrid Electric Vehicle

【奥地利】彼得·霍夫曼 (Peter Hofmann) 著
耿毅 耿彤 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

汽车先进技术译丛
新能源汽车系列

混合动力汽车技术

[奥地利] 彼得·霍夫曼 (Peter Hofmann) 著
耿 毅 耿 彤 译



机械工业出版社

纵观混合动力汽车技术发展史，油电混合动力脱颖而出，成为欧、美、日各大汽车制造商的重点研发项目之一。混合动力汽车技术的发展离不开立法支持，本书介绍了美国、欧洲的现行排放标准以及法规的进化过程，进而探讨如何降低能耗、控制尾气排放和噪声污染，以及扩展车辆的功能性和电力供应的可能性。

本书的核心部分由点到面全面呈现了混合动力汽车技术。第4章集合了混合动力车辆机械驱动、电力驱动的各个组成部分和工作原理，以及辅助设备的应用。第5章介绍了混合动力车辆的动力管理、运行策略及模拟行驶。第6章和第7章着重介绍欧、美、日多款混合动力轿车、摩托车、公交车、货车和工程车的混合驱动实例，并配以丰富的图片和主要技术参数。

本书针对的读者群为研究和开发混合动力汽车技术的工程师和学生，也可供汽车制造业及管理机构、学术界等相关人员参考使用。

Translation from German language edition:

Hybridfahrzeuge

by Peter Hofmann

Copyright© 2010 Springer Vienna.

Springer Vienna is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.

This title is published in China by China Machine Press with license from Springer. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 Springer 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内地区（不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2013-5541 号。

图书在版编目（CIP）数据

混合动力汽车技术 /（奥）彼得·霍夫曼（Peter Hofmann）著；耿毅，耿彤译. —北京：机械工业出版社，2016.12

ISBN 978-7-111-55505-6

I. ①混… II. ①彼… ②耿… ③耿… III. ①混合动力汽车
IV. ①U469.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 287425 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：连景岩 杜凡如 责任编辑：连景岩 杜凡如 谢元

责任校对：张薇 封面设计：鞠杨

责任印制：李昂

三河市宏达印刷有限公司印刷

2017 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·19.25 印张·2 插页·465 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-55505-6

定价：139.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88361066

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294

机工官博：weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网：www.cmpedu.com

译者序

目前，汽车被认为是世界上最受欢迎的交通工具，而节能减排也正在成为人们日益关注的话题。

以节能、环保为出发点的混合动力汽车（含纯电动汽车）及其相关的材料、电机、液力系统、发动机、蓄能系统、控制系统等也取得了巨大的进展和举世瞩目的成就。

近几年来，我国的混合动力汽车工业取得了长足的进步，“他山之石，可以攻玉”，借鉴国外，尤其是欧美发达国家的先进技术，对于目前我国汽车工业的发展具有一定意义。本书的译者为耿毅、耿彤，其中耿毅负责翻译文字部分，耿彤负责翻译图表并对整书的文字表达和内容进行了通篇整理。本书原作者为奥地利维也纳工业大学的彼得·霍夫曼教授，其学术造诣深厚但用词较为生涩，耿彤对很多技术表达做了符合国内读者技术习惯的修改，使之更容易被国内读者理解。

本书从实际应用的角度出发，不仅有丰富的理论阐述，更有丰富的实际整车及部件的开发案例。全书内容新颖翔实，数据完整，比较完整地讲述了混合动力汽车的组成、设计、制造、控制等关键技术要点，对于设计、调试、制造混合动力汽车具有指导意义。

本书可以作为汽车工程技术人员的参考书，也可以作为大学高年级学生及研究生的学习资料，而且针对汽车制造业、管理机构及学术界，也是一本研究混合动力汽车的好书。

由于译者水平有限，加之时间仓促，不当之处，恳请指正。

耿 毅

耿 彤

译者简介

耿毅

1981 年出生于重庆。

1999 年就读于四川外国语大学。

2001 年赴德国法兰克福歌德学院学习德语。

2003 年起就读美茵茨大学英语系。

2004 年进入美因茨大学翻译学院 FTSK (Fachbereich Translations-, Sprach- und Kulturwissenschaft der Universität Mainz in Germersheim), 主修中德、英德互译, 辅修汽车技术、能源、环保、计算机等专业, 获得德国翻译学 Diplom-Übersetzer 学位。目前仍在德国从事技术翻译。



耿彤

1969 年出生于上海。

1991 年从上海工程大学机械系毕业后进入上海起重运输机械厂工作。

1999 年起在德国勃兰登堡州立科特布斯工业大学学习德语。

2001 年起在德国斯图加特大学攻读汽车和发动机工程专业, 获德国工学硕士 Diplom-Ingenieur (Dipl. -Ing.) 学位, 毕业后在德国从事过的专业领域主要有: 整车理论和设计、行驶动力学、车身及底盘技术。

2012 年创办苏州雷姆斯汽车工程有限公司, 从事国家战略性车用产品的设计开发、重型货车核心部件的设计及制造。



前言

混合动力汽车目前正处于蓬勃发展的时期，几乎所有的汽车生产商都在开发混合动力技术，然而混合动力并不是一项全新的技术，这一技术几乎与汽车工业同时诞生。该技术发展初期的研究方向是在常规驱动装置与电力驱动装置相结合的基础上，研究如何调节发动机与动力传输（手动变速器和离合器）。如今，对混合动力系统发展起推动作用的首先是省油和减排，其次是实现混合动力的各种辅助功能，例如部分路段纯电动行驶、各种转矩矢量控制和移动供电技术。

混合动力技术通常被视为燃料电池驱动的过渡技术，因此可以预计的是，燃料电池驱动的汽车将适配蓄电装置，因此也属于混合动力汽车。混合动力技术为电动汽车进入市场和普及做出了巨大的贡献。由于蓄电池容量不足难以达到电动汽车技术所需的续航里程，所以电动汽车需要配备发动机作为增程器。

目前混合动力技术应用广泛，小到混合动力摩托车和轿车，大到货车以及公交车都可以应用此项技术。特别是当必要条件或行驶特点可以精确定义时，如对公交车、货车来说，可以相应地调整混合动力技术并优化运行策略，从而发掘出最大的省油潜力。

混合动力技术的应用越来越普遍，同时也提高了车辆的生产成本。从长远目标来看，所增加的生产成本要么通过省油节能摊还，要么通过车辆在驾驶乐趣或辅助功能方面相应增值达到平衡。政府将会通过税收和收费系统，以及在某些区域内实施限行措施，加大新技术的推广力度。

为了使混合动力汽车顺利地开发和生产，所有部件都必须达到相互的完全的协调，因此需要跨专业合作，取长补短，实现互补和协调。其中最大的挑战在研发方面，因为从发动机到变速器、电动机和储能装置各方面都需要比以往任何时候更多的来自不同的领域工程师的精诚合作，所以有必要更多地理解其他学科的基本知识，并强化沟通和知识共享。

为完成这本书的编写，本人得到了很多专业人士的帮助，比如技术讨论、文字校对和建议，在此表示诚挚的谢意。在此，尤其要提到 Andreas Schmidhofer 博士、Hochgatterer 博士和 Bernhard Schneeweiss 博士分别在章节“电机”“蓄能器”和“动力管理系统”的积极参与以及 Wolfgang Kriegl 博士对本书框架结构提出的建议。

必须提到的还有 Hans Peter Lenz 教授、Ernst Fiala 教授、Jürgen Stockmar 教授、Fritz Indra 教授和 Bernhard Geringer 教授提出的建议和进行的校对工作。

除此之外，还要感谢 Jaroslav Richter 先生和我的妻子 Tatjana 以及同事和朋友们对本书的大力支持。

值得一提的还有各大代工厂、供应商、研究所等在本书写作过程中做出的贡献。正是因为混合动力技术涵盖的范围广泛，所以必须是很多专业知识的集合。混合动力技术涵盖面广，其精髓在于将专业人士的专业知识结合起来。

本书将介绍混合动力汽车的基础知识、各种部件及其技术，以及部件之间的联系，还将探讨对混合动力汽车的普及产生显著影响的其他条件。

VI 混合动力汽车技术

混合动力汽车技术是一个极具创新的领域，在该领域中新发展和技术飞跃层出不穷。本书针对的读者群是研究和开发混合动力汽车技术的工程师和学生，以及对该领域感兴趣的从业人员。

彼得·霍夫曼

目 录

译者序 再版说明 前言

第 1 章 概述	1
1.1 汽车发展及其对环境的影响	1
1.2 混合动力汽车发展史	4
1.3 混合动力汽车的发展前景	9
第 2 章 混合动力方案的定义和分类	13
2.1 串联式混合动力	14
2.2 并联式混合动力	16
2.3 功率分流式混合动力	18
2.4 微混合动力	31
2.5 中度混合动力	33
2.6 全混合动力	34
2.7 插电式混合动力	35
2.8 小结：混合动力系统	39
第 3 章 发展混合动力系统的出发点	42
3.1 政策法规	42
3.1.1 美国排放法规	44
3.1.2 欧洲排放法规	49
3.1.3 小结	53
3.2 油耗	54
3.2.1 负荷点提升	54
3.2.2 起/停系统	56
3.2.3 电力驱动	58
3.2.4 能量回收	62
3.2.5 小结：节能潜力	65
3.3 排放和噪声控制	67
3.3.1 零排放电动行驶	67
3.3.2 负荷点提升	67

3.3.3 起/停技术	71
3.4 功能性	71
3.4.1 E4WD——电动四驱	71
3.4.2 转矩矢量分配系统	71
3.4.3 供电—充电站	75

第4章 混合驱动系统

4.1 发动机	77
4.1.1 汽油机	77
4.1.2 柴油机	77
4.1.3 二冲程发动机	78
4.1.4 旋转活塞发动机	79
4.1.5 斯特林发动机	80
4.1.6 燃气轮机	83
4.1.7 燃料电池	83
4.2 电机	85
4.2.1 工作界限和特性曲线	86
4.2.2 直流电机	89
4.2.3 交流电机	90
4.2.4 异步电机	91
4.2.5 同步电机	92
4.2.6 永磁同步电机	92
4.2.7 开关磁阻电机	94
4.2.8 横向磁通永磁电机	94
4.2.9 电机比较	96
4.2.10 实施方案	98
4.2.11 集成式变速器	99
4.3 功率电子装置（整流器）	105
4.3.1 半导体器件	106
4.3.2 电路	106
4.4 蓄能器	110
4.4.1 概述	110
4.4.2 二次电池	113
4.4.3 铅酸电池	118
4.4.4 镍镉电池	120
4.4.5 镍氢电池	121
4.4.6 锂离子电池	123
4.4.7 Zebra 电池	126
4.4.8 钠硫电池	127

4.4.9 超级电容	127
4.4.10 飞轮蓄能器	130
4.4.11 液压气动蓄能器	132
4.4.12 各种蓄能系统的比较	143
4.5 辅助装置	146
4.5.1 液压脉冲存储器 (HIS)	147
4.5.2 电动助力转向器	149
4.5.3 车载暖风和空调	151

第5章 动力管理系统..... 154

5.1 混合动力汽车的工况	155
5.2 运行策略	156
5.2.1 运行策略分类	156
5.3 混合动力汽车模拟行驶	158
5.3.1 混合动力汽车建模	159
5.3.2 运行策略举例	165
5.3.3 电器元件参数选择	172
5.3.4 热管理对运行策略的影响	176
5.4 前瞻性运行策略	180

第6章 轿车和摩托车混合动力方案详解..... 185

6.1 丰田普锐斯	185
6.2 雷克萨斯 RX400h 和 RX450h	195
6.3 雷克萨斯 GS450h	199
6.4 雷克萨斯 LS600h	202
6.5 本田整体式电机辅助 (IMA) 混合动力系统	206
6.6 奔驰 S400 混合动力	214
6.7 奔驰 ML450 混合动力	220
6.8 宝马 X6 ActiveHybrid	223
6.9 麦格纳 HYSUV	228
6.10 大众途锐混合动力	230
6.11 AVL ECO Target 混合动力	237
6.12 AVL Turbohybrid	240
6.13 欧宝 Flextrime 和 Ampera	246
6.14 大众插电式高尔夫 twinDrive	248
6.15 丰田 Supra HV - R 混合动力	252
6.16 比亚迪 MP3 混合动力	254

第7章 公交车和货车混合动力技术详解	257
7.1 混合动力公交车.....	261
7.1.1 Orion 7代 HybriDrive 公交车	261
7.1.2 三菱扶桑 Aero 公交车	263
7.1.3 奔驰 Citaro G BlueTec 混合动力公交车	264
7.1.4 曼混合动力公交车	265
7.1.5 Hess 双铰接混合动力公交车	269
7.1.6 沃尔沃 7700 并联式混合动力公交车.....	269
7.1.7 依维柯 Irisbus Hynovis 混合动力公交车.....	272
7.1.8 Solaris Urbino 18 混合动力公交车	273
7.1.9 斯堪尼亚混合动力概念公交车	273
7.2 混合动力货车	276
7.2.1 奔驰斯宾特 (Sprinter) 插电式混合动力多用途货车	276
7.2.2 曼轻型货车.....	278
7.2.3 三菱扶桑 Canter Eco 混合动力轻型货车	282
7.2.4 奔驰福莱纳 M2	284
7.2.5 奔驰 Atego BlueTec 混合动力货车	285
7.2.6 沃尔沃 FE 垃圾回收车.....	286
7.2.7 搭载液压再生制动系统的垃圾回收车	287
第8章 发展前景	289
参考文献	290

1.1 汽车发展及其对环境的影响

移动性是人类的基本需求之一，因此汽车被认为是全球最受欢迎的陆上交通工具，汽车工业则是主要的制造业之一。在过去的 100 年里，汽车一直在不断发展，尽管在安全性、舒适性、性能和效率等方面得到稳步改善，但仍有优化发展的潜力可挖。汽车油耗和相应的二氧化碳排放量首当其冲，成为关注的焦点，原因之一在于化石燃料储量有限，特别是自工业革命以来大气中的二氧化碳含量剧增，对全球气候变暖造成不可逆转的影响，见图 1.1。

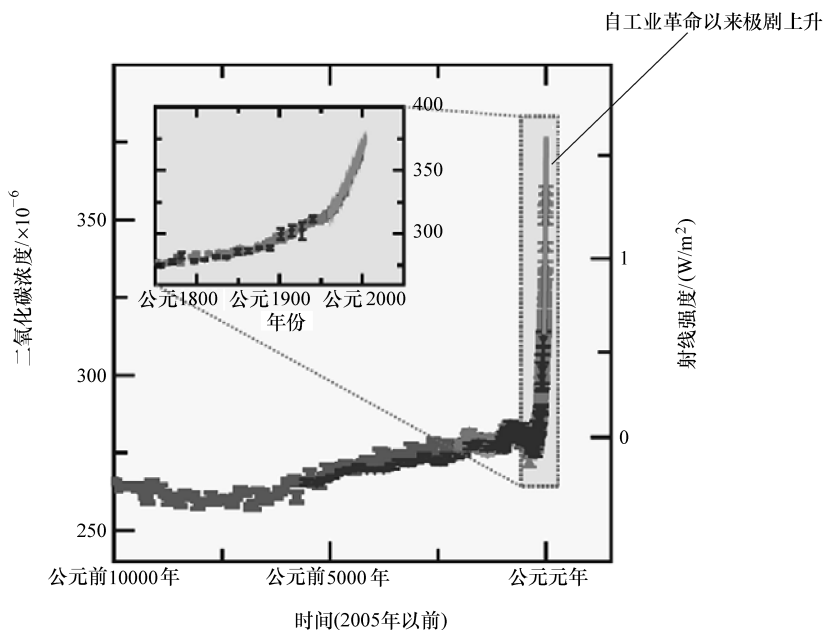


图 1.1 公元前 10000 年及公元 1750 年以来大气中的二氧化碳浓度和射线强度

从图 1.2 中可以看出，仅 2005 年，交通运输行业造成的二氧化碳排放量在欧盟国家约占人为二氧化碳排放总量的四分之一。为了遏制这一比例的扩大，需要在各个行业采取措施。

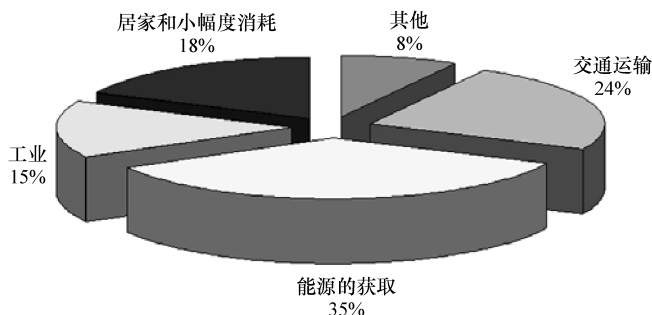


图 1.2 欧盟 15 国各个行业 CO₂ 排放量占比 (2005 年)

在汽车工业方面，欧盟的规定是：在 2012 年，各大汽车制造商全部新出厂的车辆平均二氧化碳排放量达到 120g/km，见图 1.3。因此需要通过改进发动机和汽车技术先将二氧化碳排放量减至 130g/km，剩下的 10g/km 的二氧化碳排放量将通过采取一些辅助措施达到，比如用生物燃料代替常规化石燃料。2012 年欧盟各大汽车制造商 65% 的出厂汽车必须达到 120g/km 的二氧化碳排放标准。基本上，如雪铁龙 C1、雷诺 Twingo 1.5 DCI、大众 Polo、Smart 等汽车已经达到新欧洲循环行驶标准所规定的 120g/km 的二氧化碳排放标准。然而消费者购买排量更大的汽车的趋势有增无减，因此只通过不断改进动力总成而减少出厂车辆的平均油耗值是不够的。

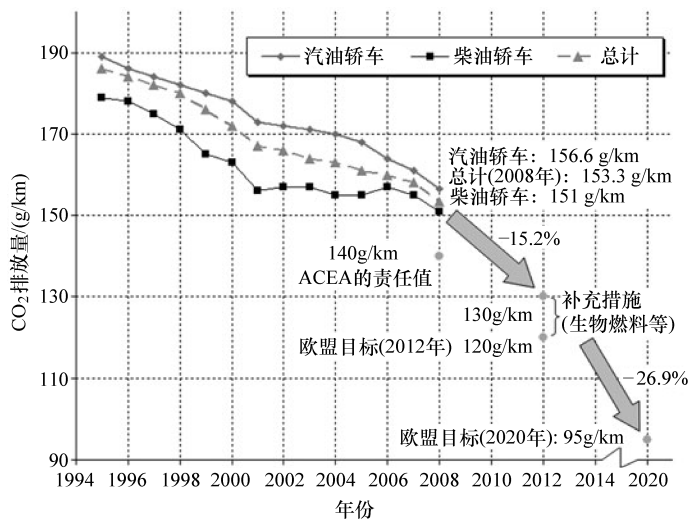


图 1.3 欧盟 15 国平均每台出厂新车的 CO₂ 排放量及 2020 年的排放目标

即使是在减排的大环境下，个别欧盟国家生产厂商全部汽车的平均油耗值有暂时上升的趋势，部分原因是大型越野车销售量居高不下。如图 1.3 所示，近年来柴油车销售量大增在一定程度上延缓了这一上升趋势。由于汽车购买力几乎没有受到高油价的影响，要提高大排量车辆的性能和效率必须大力寻求技术上的突破。因为能量是守恒的，所以这些技术方向所指的只能是提高能量转换效率、提升操作自由度以及加大汽车怠速时能量回收的可能性。根据新欧洲循环行驶标准，汽车在市内行驶时具有极大的节能潜力。混合动力汽车发展前景可观，因为该技术不仅能持续地提高发动机性能，即提高初次能源转换效率，而且为进一步能

源转换提供更多的自由度，比如制动能量的回收和储存等可能性。

混合动力的英文单词“Hybrid”来自拉丁语，表示“两种、两类”，转义表示“父母”。联合国在2003年对混合动力汽车给出如下定义：混合动力汽车是指至少搭载两种用于驱动车辆的动力源和两种蓄能系统的汽车。从理论上而言，化学能、电能或机械能的储存皆有可能。实际上，传统化学蓄能器的搭配，即可在行驶中回收能量的蓄能器将提升车辆操作自由度。在此，化学蓄能器即能量载体，是指汽油和柴油，而回收能量的蓄能器是蓄电池或机械蓄能系统。

在汽车发展史中，曾有人多次试图利用机械蓄能系统，如飞轮、弹簧蓄能器、蓄压器等，但到目前为止，这些系统无一在汽车工业领域内获得更大成功。图1.4为从1956年产飞轮蓄能公交车（样车）在所谓的“充电站”充电。充电过程中，电流通过一台电动/发电一体机带动飞轮高速转动形成动能。储存的动能在行驶过程中通过发电机转化为电能，用于车辆纯电动驱动。由此使车辆行驶到下一站，即在所谓的“充电站”再次充电。



图1.4 飞轮蓄能公交车（Gyrobus）于1956年在比利时梅勒尔贝克终点站的充电站充电

一方面由于飞轮可储存的能量密度相对有限，另一方面，飞轮蓄能系统存在不容忽视的潜在危险，即在释放储存的能量过程中不受控制，因此该蓄能系统曾消失了很长一段时间。目前这种尝试被重新启动，例如在某些赛车上被使用，参见本书章节4.4。

气动或液压气动蓄能系统一直是热门课题。1931年，美国工程师罗伊·杰罗姆·迈耶斯发明了搭载6缸空气动力发动机的压缩空气动力汽车，虽然行驶速度缓慢，但有效行驶距离相当可观，见图1.5。

整体效率低和蓄能密度低意味着该系统作为汽车驱动系统并不能满足要求，而只能进行其他的尝试，比如应用于井下采矿作业。气动液压蓄能器是气动和液压两个系统的结合体，拥有巨大潜力。如图1.6所示，它由一个高压蓄能器一个低压蓄能器和一台运转可逆的液压机组成。其中，液压机相当于涡轮机和气泵。车辆减速时液压流体被从低压蓄能器抽到高压蓄能器中，从而压缩其中的惰性气体。在加速的时候恰恰相反，所储存能量通过涡轮模式驱动车辆。

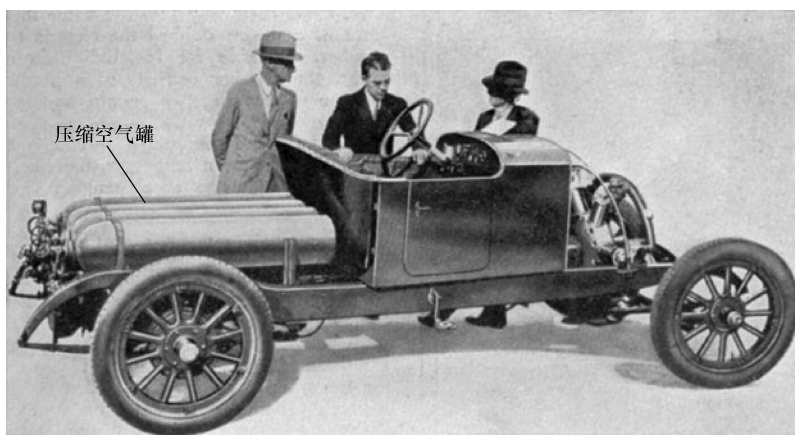


图 1.5 迈耶斯的压缩空气动力汽车（1931 年）

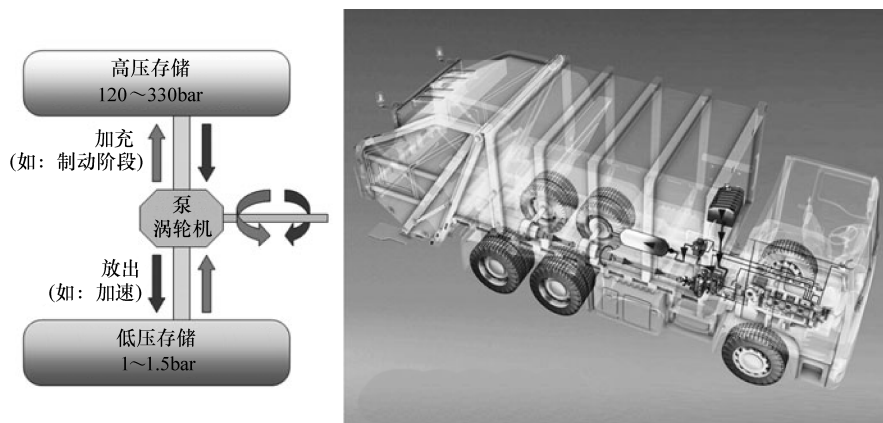


图 1.6 在垃圾收集车上的气动液压蓄能器的工作原理

虽然该系统功率密度非常高，但与蓄电系统的能量密度相比，仍然非常有限，因此该系统应用在常规车辆中并不现实。该系统在某些领域的应用上一直卓有成效，例如重型市政车辆，如公交车、垃圾回收车、铲车，原因在于该系统成本低、结构简单，见本书第 7 章所述的公交车和搭载博世力士乐系统的垃圾回收车。

真正有所突破和迄今为止覆盖面最广的要数以化学和电力系统组合为基础的混合动力汽车。这类车或多或少通过传统的发动机将燃料中的化学能转化成机械能，同时通过电动机将存储在电池或电容器内的电能转化为机械能，或者反之通过发电机将机械能转化为电能。

1.2 混合动力汽车发展史

其实在汽车发展的早期就已经研发出混合动力汽车。作为洛纳汽车公司研发主管，费迪南德·保时捷（Ferdinand Porsche）于 1899 年在维也纳打造出一辆混合动力汽车。该车于 1900 年巴黎世博会上展出并引起极大轰动。这款交通工具的组成部分不含齿轮、传动带、链条、差速器等中间传动装置，也就是说，这是历史上第一辆非传动式动力汽车。如图 1.7 所示，这辆车左右两个前轮的轮毂上各装配一台电机，并同时作为驱动轮和转向轮。这台轮毂电机驱动汽



图 1.7 洛纳 - 保时捷车型采用轮毂电机前轮驱动（重达 1t）
（含有 410kg 电池）约 50km 续航能力，最高速度 50km/h

车让 24 岁的保时捷在汽车工业界一举成名。这辆由两台轮毂电机驱动的电动车以端电压 60 ~ 80V、电量 170 ~ 300A · h 蓄电池作为电源。轮毂电机的功率为 2.5PS (1PS = 735.5W)，转速为 120r/min。该车的弱点是续航里程有限，仅为 50km。因此保时捷在此基础上为这款汽车加载了汽油机和发电机，从而可以在行驶过程中在一定程度上完成充电功能。根据今天的定义，这款在维也纳发明的轮毂电机驱动的汽车属于串联式混合动力汽车。

随后混合动力汽车的历史时间轴为：首先出现的是迪翁发动机，然后是戴姆勒发动机、梅赛德斯发动机，此后是潘哈德发动机，直到最后梅赛德斯 Mixte 问世。

如图 1.8 所示，油电混合动力汽车使用奥地利戴姆勒发动机公司生产的直列四缸发动机。在汽油机飞轮处装配一台发电机。发电机直接连接发动机曲轴。发电机的电枢缠绕在一块磁星上。汽油机转动，将动能转化为电能，通过电线传输给轮毂电机。该系统采用的是串联式混合动力技术。

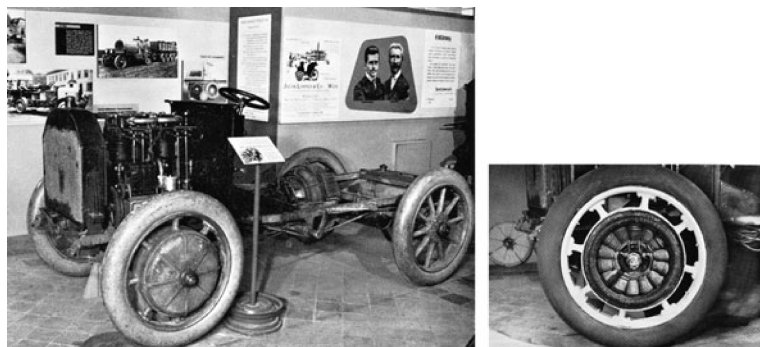


图 1.8 洛纳 - 保时捷车型的油电混合动力汽车（1901—1905 年制造，轮毂内有电机电极）

轮毂中的电机具有一个电枢及旋转的机壳。机壳连接轮辋，作为车轮的一部分。磁星嵌入驱动轴，目的在于固定，如图 1.8 所示。

该混合动力系统主要应用于货车、公交车和消防车，也应用于赛车，如图 1.9 和图 1.10 所示。

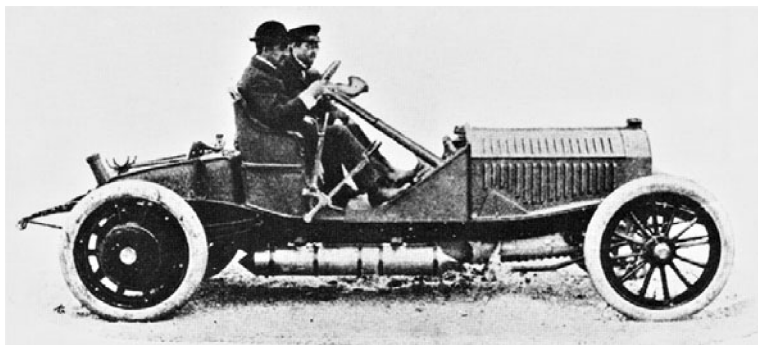


图 1.9 由费迪南德·保时捷驾驶的 Mixte 赛车



图 1.10 1908 年 9 月 6 日《汽车汇报》上刊登的广告

梅赛德斯 Mixte 赛车被寄予厚望，但在其发展过程中却出现了瓶颈。随着发动机技术的进步，汽油机的转速越来越高。这在混合动力汽车上的进一步体现则是：在保持相同速度的同时，虽然增加了电极数量，但电机由此产生的热量无法完全散出。之后，轮毂电机被其他技术所取代。

混合动力在汽车行业消失，但这一系统却被运用于军事中，如第一次世界大战时出现的重型火炮运输车 and 后备军用列车。

当时混合动力汽车的研发也是在全球范围内展开的。几乎在洛纳 - 保时捷混合动力汽车

出现的同时，西班牙人设计出一款具有相似驱动原理的汽车——拉·夸德拉（La Cuadra）。该设计方案中也包括电动机、发电机和小型发动机，但这一设计未能付诸实践。

美国克里格公司（Krieger Company）于1903年开发出第一款微串联式混合动力汽车，配备前轮驱动和助力转向。

加拿大高尔特汽车公司（Galt Motor Company）于1914年生产出一辆混合动力汽车。该车搭载一台10PS双缸二冲程汽油发动机和一台西屋电气（Westinghouse）电机进行驱动。该电机输入电压为40V，电流为90A，如图1.11所示。车体内置4块蓄电池，为提速提供电力支持，或者依靠纯电动驱动行驶15~20mile（1mile=1609m）。电机（无需通过变速器）直接与差速器相连。通过变速杆可在5个前进档和3个倒档中进行切换。据称，该车油耗约为3L/100km，但是只生产了两辆。

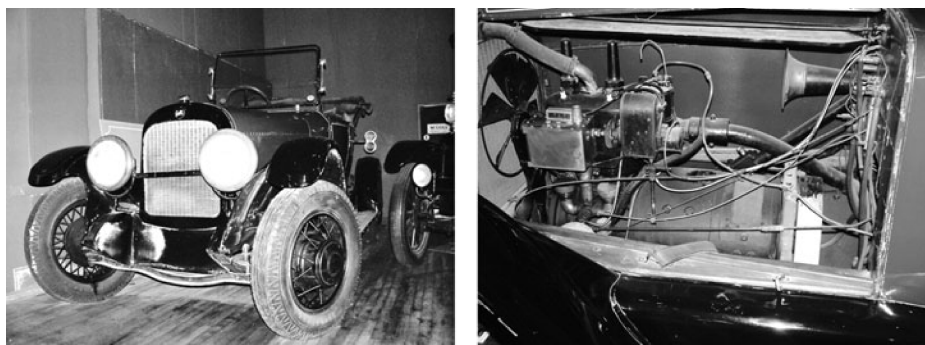


图 1.11 高尔特汽车公司1914年生产的串联混合动力汽车
带双缸二冲程发动机（10PS）、西屋电气电机（5PS）

值得一提的是德国大众公司早期的混合动力技术。如图1.12所示，这一混合驱动装置发布于1974年“纽约出租车大赛”中。一台电机直接与驱动器啮合。离合器断开时，形成纯电动行驶。离合器闭合时，汽油机起动，为汽车行驶提供动力，多余的电能可用于给蓄电池充电。制动力做功后也可转化为电能，储存于蓄电池中。

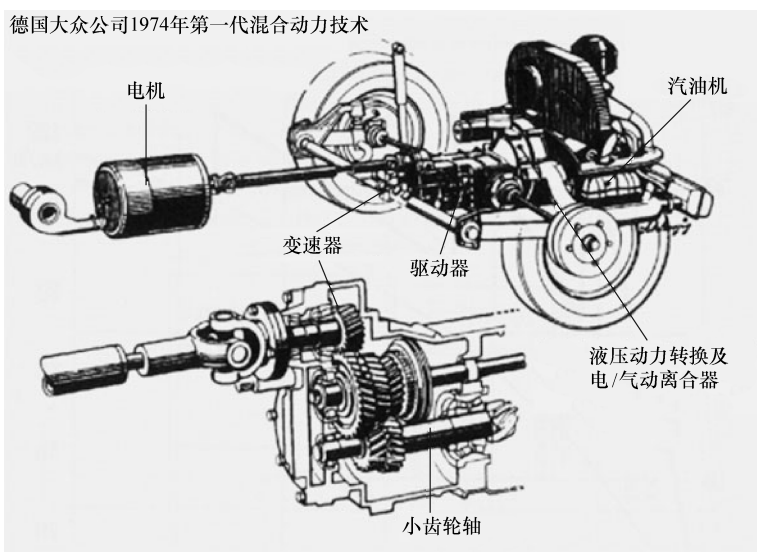


图 1.12 1974年“纽约出租车大赛”中发布的大众巴士混合动力技术

欧、美、日各大汽车制造商从 20 世纪 70 年代开始研发混合动力汽车，生产了规模不等的试用车系。

奥迪于 1994 年推出奥迪 80 Duo (图 1.13)，成为第一个将混合动力汽车投入市场的汽车制造商。然而由于这款汽车太昂贵，销售业绩非常惨淡。之后，奥迪又在 Duo 的基础上推出 A4 Avant。这是第一款投入欧洲市场的混合动力汽车系列。1997 年这款车在德国的上市销售价为 6 万马克，但几乎无人问津。由于市场需求量太小，这款车在 1998 年停产。

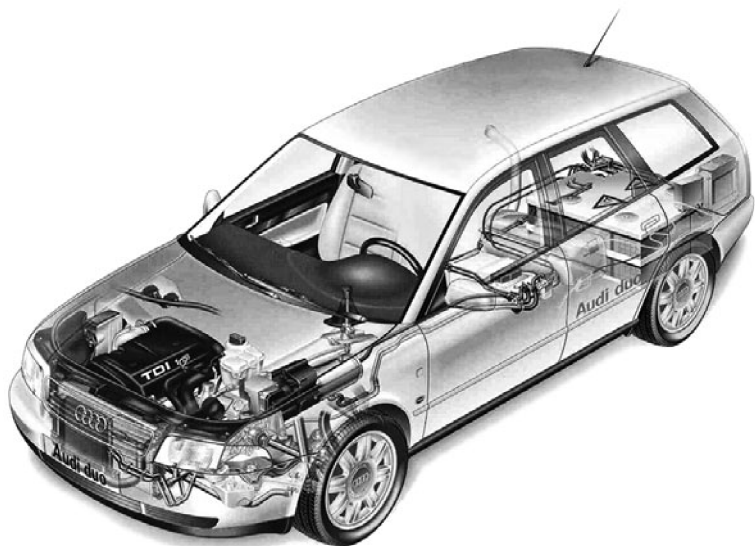


图 1.13 奥迪 Duo 混合动力汽车

该车采用排量 1.9L、额定功率 66kW 的 TDI 发动机以及一台功率为 21kW 的同步电机。同步电机连接在 5 速变速器上，由于该驱动系统的额定转速为 10 000r/min，因此也被称为高转速技术（和发动机转速相比明显偏高）。

铅酸蓄电池作为奥迪 Duo 的蓄能器，安装在行李舱，重达 320kg、容量 10kW·h。其特点是可以接电源线和插头，驾驶人可将插头插到电源插座进行充电（这就是插电式混合动力技术）。

随着丰田在 1997 年推出普锐斯，在混合动力汽车市场份额上才取得了重大突破。截至 2010 年，市场上销售的普锐斯系列已经发展到第三代，如图 1.14 所示。发动机和电机通过行星齿轮与传动轴耦合。必要的时候可以使发动机完全停止运转，进行纯电力驱动。丰田混合动力系统的更多细节参阅本书第 6 章。

简短回顾混合动力技术在汽车工业中的发展史，得出一个明确的结论，混合动力技术并非一项全新的技术，它贯穿整个汽车工业的发展历程。以前的问题在于如何通过电机调节发动机和传动系统之间的关系（变速器和离合器），而如今的发展重点在于节能减排，由此推动了混合动力技术的发展。值得注意的是，在汽车发展的初期，电机就作为起动机，有助于扩大发动机工作范围。



图 1.14 丰田普锐斯混合动力汽车

在此应该指出，欧洲汽车制造商基本上一直作为这项技术的开拓者和领导者，但是这一领先优势缺乏持续性，因此不足以引领混合动力汽车的潮流。丰田通过斥巨资进行研发，配合完美的市场营销和灵活的市场引导策略，确立了其在混合动力领域的领头羊地位。与此同时，丰田采取受欢迎的宣传措施，如邀请影星拍摄广告，利用风阻系数和路面滚动阻力系数对混合动力技术进行数据支持，从而更好地扩大其混合动力汽车技术的影响力。

1.3 混合动力汽车的发展前景

混合动力汽车在日本和欧美市场的需求量逐渐增大，而欧洲市场发展相对缓慢，但目前几乎所有汽车制造商都再度紧盯混合动力技术。从长远来看，除了继续提高发动机的效率以外，还有一种可能性是加大汽车动力总成中的电气化比重，直到使用高能电池和燃料电池的纯电动车时代到来。图 1.15 展示了大众汽车的发展理念。

总而言之，各大汽车品牌在国际市场上相对应的交通状况和使用情况不同。在日本，大城市人口密集，交通非常拥堵，而在美国部分地区，低速行驶和起步停车较为频繁，因此在这两个国家更适选择混合动力汽车。在欧洲，柴油车继续作为主导力量，但在多用于短途行驶的车辆上加大动力总成电气化程度。

图 1.16 是奥纬咨询公司（Oliver Wyman）在 2005 年做出的前瞻。该公司当时预测到 2015 年，轿车和轻型货车将从 2005 年的 6300 万辆上升到 7500 万辆。其中非全燃油驱动的车辆比例将从 3% 上升到 17%，而混合动力汽车的比例将达到 11%。

图 1.17 显示了根据混合程度分类的混合驱动技术，根据此分类，微混合和中度混合动力汽车凭借其容易实现且性价比高的优势，将在近年内大大赶超目前在产量上处于优势地位的全混合动力汽车。全混合动力更适用于自重偏重的车辆，更确切地说，排放法规的制定加速了全混合动力的应用。

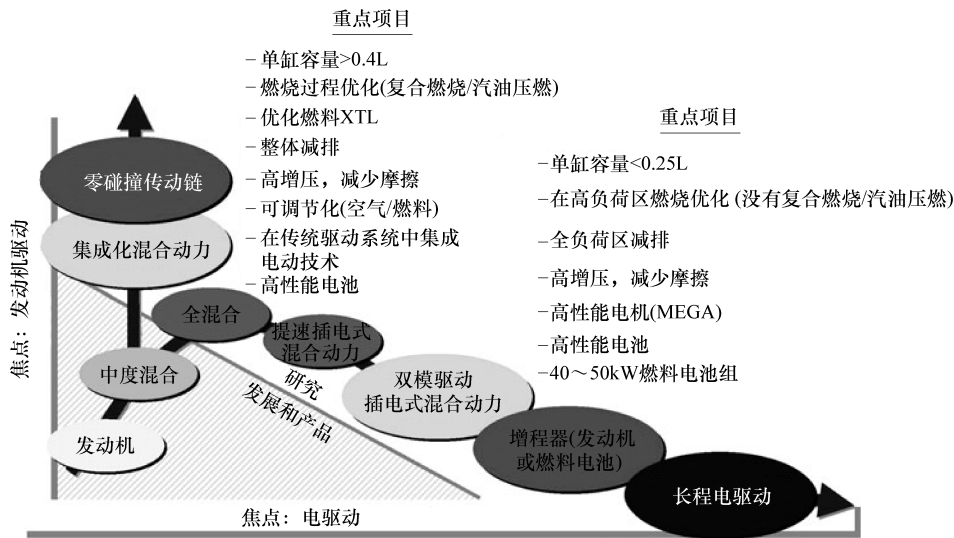


图 1.15 大众公司“展望可持续发展的驱动系统”的二维图

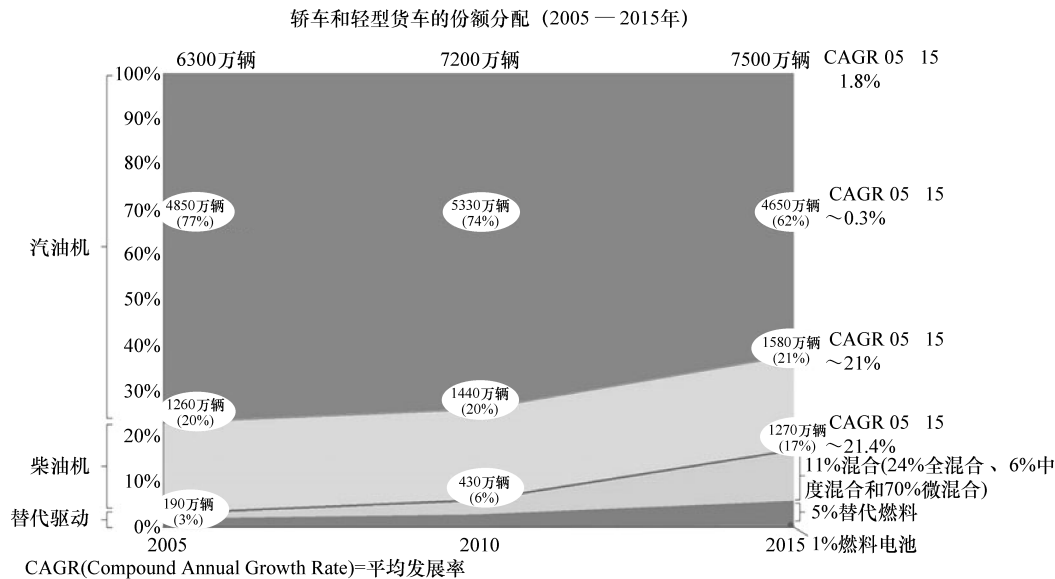


图 1.16 世界范围内不同驱动技术的发展——轿车和轻型货车

图 1.18 体现的是对不同混合动力汽车市场份额预测的平均值以及预测数据的比较。其中数据显示，微混合动力并未受到重视。图中，预计产量规模跟上文所述奥纬咨询公司的分析类似。

在城市交通方面，混合动力汽车节能减排的潜力显而易见。强势引入这一技术导致汽车成本上升，每辆中度混合动力车的造价超过 3000 欧元/t CO₂e（减排量），而全混合动力车则接近 5000 欧元/t CO₂e。微混合动力既可以一定程度上降低油耗，又可以实现低成本生

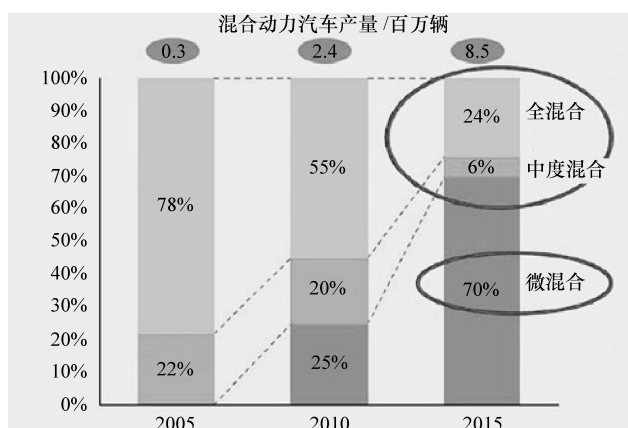


图 1.17 根据混合程度划分的混合动力汽车年产量

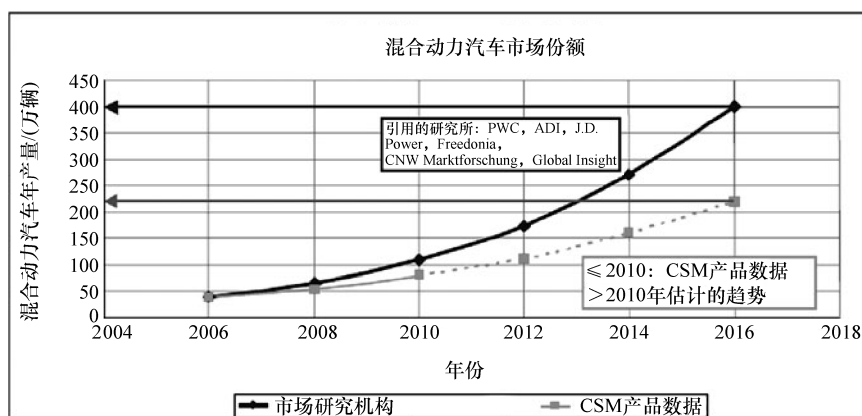


图 1.18 混合动力的产量（乐观和保守的看法）

产，这就是起/停系统市场占有率高的原因。图 1.19 直观描述了通过发展混合动力汽车减排费用相对较高以及其他有减排潜力的技术的应用。虽然这里的数据只说明了在德国减排成本的情况，但在其他工业国家也大致如此。

根据 2008 年制定的边界条件，图 1.20 体现出不同系列方案与相关降低油耗措施二者之间的摊还关系。这里以一台重 1.6t、排量为 2.0L 的中档车为例：纵轴为该车每年行驶 15 000km 累计 3 年节省的燃油费，横轴为节能计划所需额外费用。画斜杠的圆圈表示汽油车，实心圆圈表示柴油车。在平分线以上部分，说明这些系列计划所需额外费用能在 3 年内摊还，也就是说节省额大于额外的支出。显而易见，微混合动力技术（起/停系统、高效发电机等）3 年内完成摊还，而全混合动力技术额外费用（尤其是电池费用）高，摊还时间长。

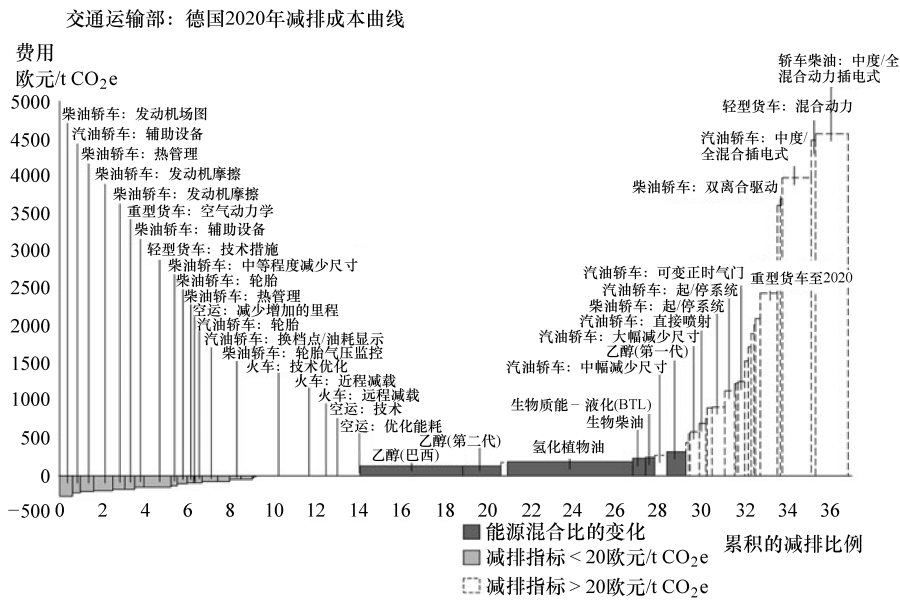


图 1.19 2020 年德国采用不同 CO₂ 减排措施的费用

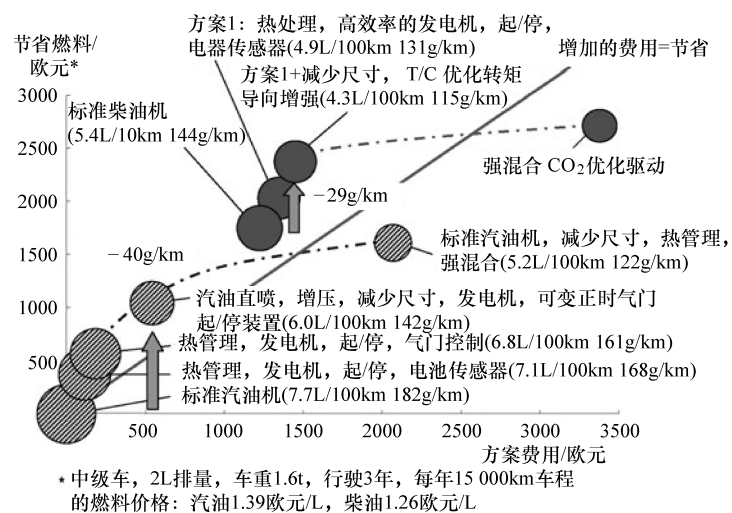


图 1.20 有选择的 CO₂ 减排方案的性价比——燃料价格和方案价格（2008 年）

混合动力方案的定义和分类

第2章

如图 2.1 所示，根据发动机、电动机、发电机、电池和变速器的不同组合，混合动力汽车技术可以分为：串联式混合动力、并联式混合动力和功率分流式混合动力。

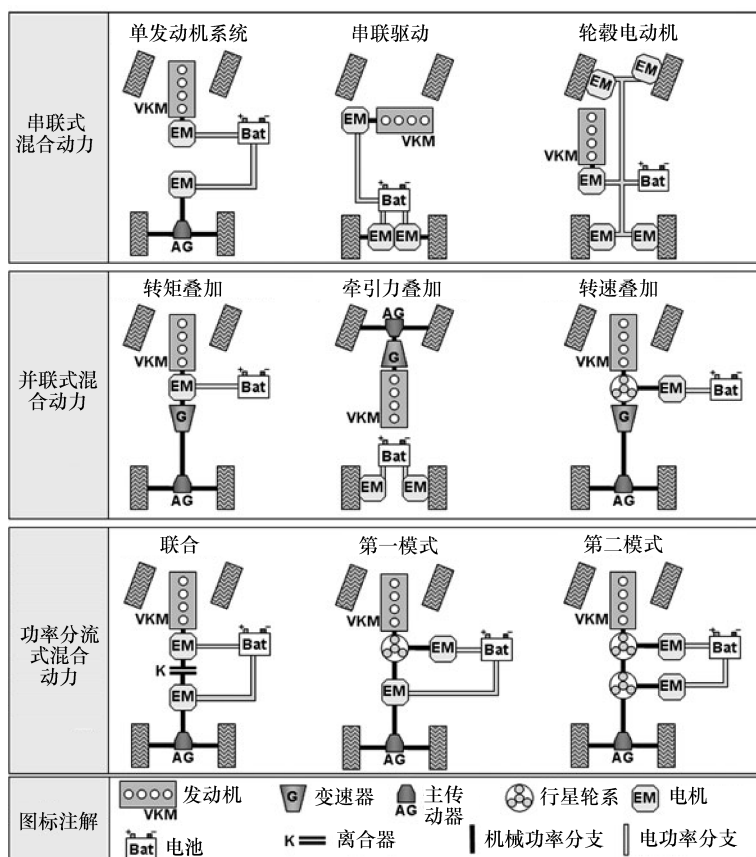


图 2.1 不同的混合动力驱动结构

此外，混合动力汽车也可以根据动力混合程度分为：微混合动力、中度混合动力、全混合动力、插电式混合动力。

各种混合动力的功能和用途概述见表 2.1。

表 2.1 不同的混合动力方式的功能应用

功能和使用	微混合	中度混合	全混合	插电式混合
结构	更有效的起动机和可控的发电机或传动带式起动机/发电机	曲轴起动机/发电机 (KSG)	离合器作用于发动机或多台电机	电驱动带有发动机作为增程器
功能	- 起/停 - 有限的回收系统	- 起/停 - 能量回收 - 电器增压机 - 发电机运行 - 有限制的电动行驶 (低速)	- 起/停 - 能量回收 - 电器增压机 - 发电机运行 - 短途的电动行驶	- 起/停 - 能量回收 - 增强器 - 发电机运行 - 中程的电动行驶 - 外置充电装置
电机功率	2 ~ 3kW	10 ~ 15kW	>> 15kW	>> 15kW
电压值	12 ~ 42V	42 ~ 150V + 12V 车载电源	> 260V + 12V 车载电源	> 200V + 12V 车载电源
采用的典型电池技术	铅酸, AGM	镍氢、锂离子电池、超级电容 + 铅酸	镍氢、锂离子电池 (+ 铅酸)	镍氢、锂离子电池 (+ 铅酸)
节省的能量	5% ~ 10%	10% ~ 20%	> 20%	—
车型	BMW 1cr 2007 Saturn Vuc Greenline Hybrid 2007 Saturn Aura Greenline Hybrid 2007	Chevrolet Siverado 2004 Citroën C4 Hybrid HDi 2006 GMC Sierra 2004 Honda Civic IMA 2004 u. 2006 Honda Insight IMA 1999 Peugeot 307 Hybrid HDi 2006 Sature Aure Greenline Hybrid Mercedes S400 Hybrid	Audi Duo 1997 Audi Q7 Hybrid 2005 BMW X3 Efficient Dynamics 2005 Chevrolet Tahoe Hybrid 2008 Ford Escape Hybrid 2005 GMC Yukon Hybrid 2008 Lexus RX400h 2005 Toyota Prius 2001 Mercedes ML450 Hybrid	Volvo Recharge Renault Kangoo Elect' road Renault Kangoo Cleanova II Opel Flextreme VW twinDrive

由于电池不是通过外接电源从外电网充电，所以微混合、中度混合和全混合动力也被称为自给式混合动力。

2.1 串联式混合动力

串联式混合动力汽车或串联着的混合方案，其组成是发动机与发电机相连。该类车辆实际是由电动机进行驱动。发动机和传动轴之间无机械连接，即二者通过两个变换器（或者一个整流器和一个变流器）和所谓的“中间电路”相连。各个驱动部件通过电路串联在一起，见图 2.1。

能量通过“发电组”（发动机和发电机）发电，既直接传输给电动机，又用于给电池充

电。发电装置跟汽车状态没有关联，即使是汽车静止的时候也可以运转，并给电池充电。通常有两种技术方案：其一是发电装置连接一台电机和差速器，其二是前后轴每轴各接两台电动机，无需轮毂电机和差速器，见图 2.1。

1. 常规设计

常规串联式混合动力系统由功率相当的发动机、发电机和行驶电动机组成。为了使车辆达到理想的最高行驶速度，行驶电动机必须有较大的参数，以保持其较高连续输出功率。由于在该情况下无法采用电池供电，这就要求充电机组直接为电动机供电，因此要求发电机组的功率必须与电动机的功率相当，或者考虑到能量传输损耗，应略大于行驶电动机的功率。

由于该设计与最大功率（最高车速）相关，所以三台动力装置通常需要足够的功率，以便在城区内行驶所对应的部分负荷极端情况下，或在频繁起停时，大部分多余的机械能被转化为电能，储存于电池中。这种设计的效率较低，因此油耗较高。

2. 搭载增程器的插电式混合动力汽车

在插电式混合动力汽车上使用串联式混合动力技术，由于发电机组仅用于增加续航里程，其功率可以远小于行驶电动机，因为它仅用于提高行驶里程，所以也被称作增程器或辅助动力装置。所以在该情况下发电机组发电并非为了保持车辆高速行驶。在动力电池覆盖峰值功率的同时，该装置在大多数情况下为车辆在城区内行驶提供平均所需的功率。车辆主要由外接电网充电的动力电池进行驱动，即插电式混合动力。这种设计避免了发电机组在部分负荷状态运行，而是在油耗和排量最低载荷点运行。

3. 串联式混合驱动的优势和劣势

串联式混合驱动的优势在于发电机组完全不受车轮驱动系统调节。因此这种驱动形式有很大的减排潜力，列举如下：

1) 发电机组起动滞后，因此发动机和特殊的尾气再处理装置为起动做准备，为发动机和三元催化转化器预热。

2) 排放优化策略。

3) 发动机在最佳点运行，油耗或排放达到最佳值。

4) 运转稳定且避免出现排放值的波动。

5) 断开策略。

6) 间歇操作策略（取决于三元催化转化器的冷却状态）。

7) 发电机组位置可以不固定，便于开发新技术。

串联式混合驱动的劣势在于多次能量转换，根据不同的设计理念，最极端的情况下（图 2.2）可能出现高达 11 次的能量损失。这就可以解释为什么到目前为止串联式混合驱动仍然无法达到常规发动机驱动的油耗水平。发动机在最佳油耗下运行所获得的优势可以被电能和化学能转化过程中造成的能量损失轻易抵消。尤其是在大量电能必须缓存在动力电池中时，油耗值较高。必须调整和尝试新的驱动策略，以尽量减少能量损失。锂离子电池系统的应用在这方面取得重大进展。该系统明显降低了充放电的能量损失，使串联式混合技术在轿车应用中更具吸引力。

新混合动力技术，如欧宝 Flextrime（见第 6 章）在优化和调整驱动部件方面迈进一大步，这款采用串联技术的插电式混合动力汽车油耗低，与常规汽车相当。除了插电式混合动力汽车以外，串联式混合动力技术优先应用于公交车驱动。

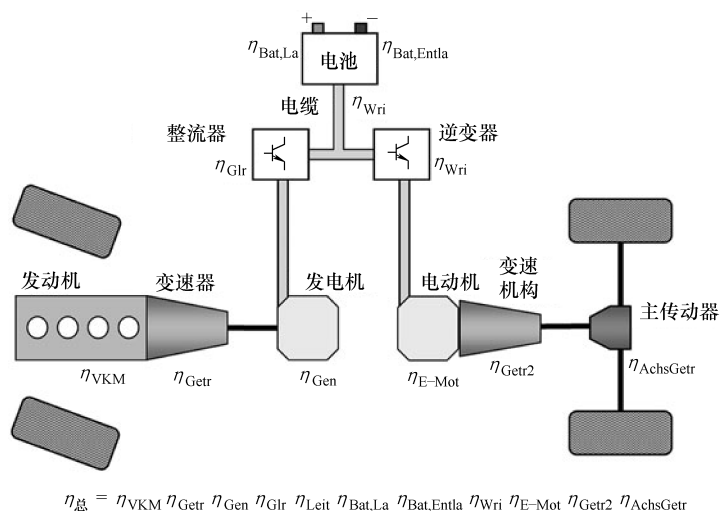


图 2.2 串联式混合动力汽车的效率链

2.2 并联式混合动力

第二类混合动力技术是并联式混合动力，该技术可以实现由发动机直接地驱动车轮。其电力分支为并联式，可随意接通和断开，如图 2.1 所示。发动机和电机可以根据需求断开，使车辆可以拥有三种驱动模式，即纯电力、传统发动机和混合驱动，可以增加输出功率。该技术除了配置两台驱动电机和两个蓄能器以外，还配置一个或多个变速器、离合器或自由轮。

电机和发动机的输出功率可以借助增加转速（通过一个行星齿轮）、增加转矩（通过圆柱齿轮变速器或链条直接啮合）和增加牵引力（电机和发动机带动不同的传动轴）进行机械叠加。

1) 增加转矩是指：两个能量转换器在一个固定的转速比下，转矩比可随意变换。两组驱动系统退耦可以通过一个自由轮或离合器实现。

如图 2.3 所示，单轴和双轴并联式混合动力的区别在于，单轴结构中电机和发动机连接同一变速器输入轴，而双轴结构中电机和发动机连接不同的传动轴，即变速器输入轴和输出轴。单轴结构的实例是曲轴起动的发电机，双轴结构实例见本书 6.10 中关于 AVL ECO Target 的介绍。

2) 增加转速是指：当转矩比根据变速器的变速比固定时，通过行星齿轮将能量转换器的功率叠加起来。驱动系统的转速可以随意选择，见图 2.1。

3) 增加牵引力按照力学上来讲也是增加转矩，是指两个能量转换器作用于不同的轴，比如发动机作用于前轴，电机作用于后轴，见图 2.4。

具体而言，也有将不同混合动力系统结合在一起的情况，如雷克萨斯 RX400h，参见本书 6.2。在这种情况下，功率分流式混合驱动装置作用于前轴（见本书 2.3），电驱动装置作用于后轴，可增加牵引力。

4) 并联式混合驱动的优劣势。只需要一台电机，该电机根据需要作为行驶电机或发电

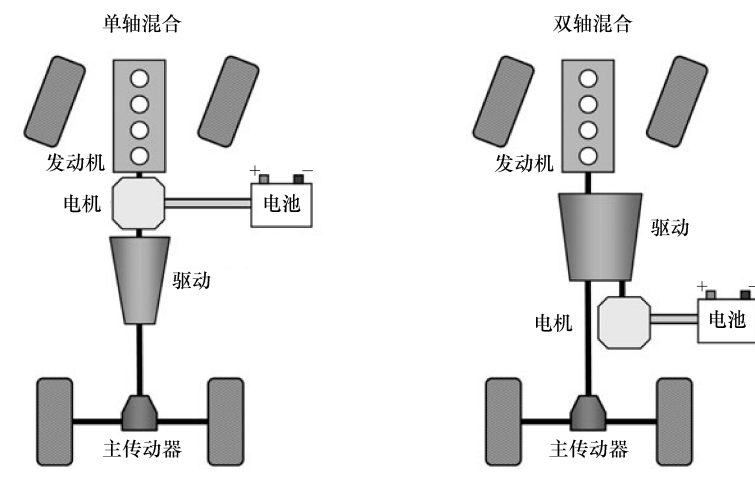


图 2.3 单双轴并联式混合动力系统

- 全轮驱动，系统功率147kW
- 在新欧洲行驶循环工况下平均油耗3.8L/100km
- CO₂排放量：99g/km

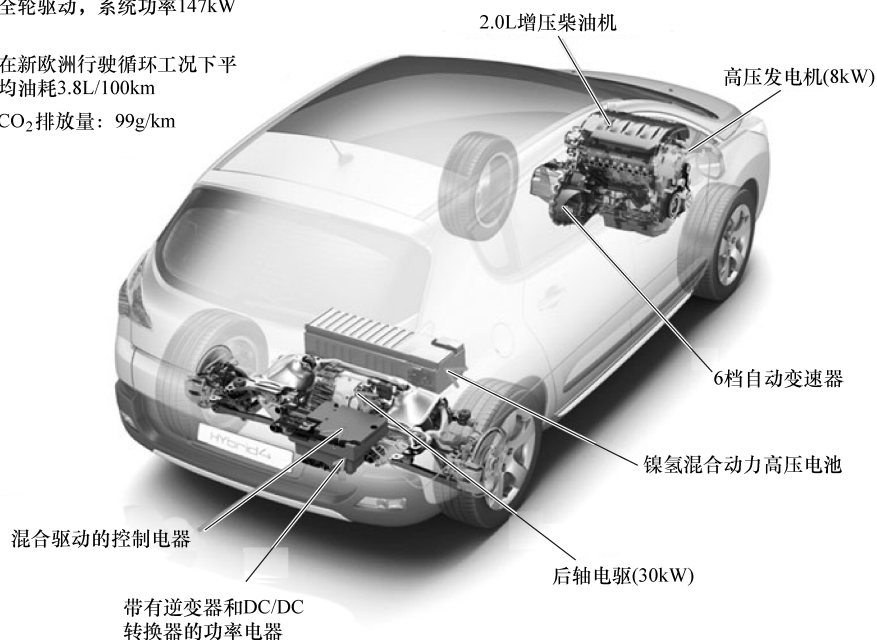


图 2.4 带有牵引力增强的 Prologue Hybrid 4 概念车（标致雪铁龙）

机使用。驱动装置的功率大小分配更为科学，因为发动机用于持续高速行驶，而电机用于城区内行驶，也就是大功率采用内燃发动机，小功率采用电驱动装置。当然，大功率电驱动装置和小功率内燃发动机的组合也同样可行。

此外，发动机直接机械式驱动车轮，其在保持高速行驶时可达到最佳效率，因为不存在电能转换带来的能量损失。

因此，该驱动技术实现低油耗的潜力最大。

其缺点：在排放和能源消耗上有不足之处，即发动机无法一直处于最佳工作状态，因

此, 形成对齿轮传动的依赖, 排放和能耗在不同行驶状态下产生了差别, 由此可见并联式混合动力放弃了一些串联式混合的长处, 如牺牲发动机的最佳工作状态。

2.3 功率分流式混合动力

功率分流式混合动力又称混联式混合动力, 其特征是发动机产生的机械功率分开成为机械和电气两个分支。相对于自动和手自一体变速器而言, 功率分流传动可以使汽车在同样的行驶里程中降低机械传动部件的能量消耗。

混联式混合动力的特殊性在于, 通过两台电机和耦合元件使驱动系统既可以形成串联式, 也可以形成并联式, 如图 2.5 所示。这个系统详细说明了其可能的操作策略, 请参阅本书 6.14 中的大众 twinDrive 实例。

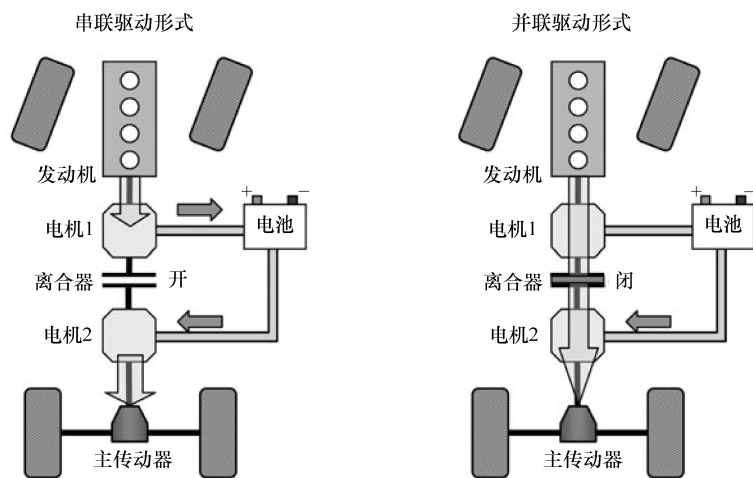


图 2.5 包含串联和并联驱动方式的混联式混合动力传动链

电动功率分流式变速器有时也被称为电动无级变速器 (E-CVT), 由两个耦合的变速元件和一台变速电机组成, 也就是说至少由两台电机和配套的功率电器设备组成。机械能转化成电能用于调节变速电机轴上的转速和转矩。这个变速器的主要特点是发动机产生的功率分为机械和电气两个分支。图 2.6 示意性地给出了带两台电机的功率分流式变速器, 这种情况下两台电机连接一组齿轮组, 起到变速电机的作用。这个齿轮组可能是由几组行星齿轮机构、几种变速比和离合器排列组合而成。选择一组适合的齿轮组和相应的变速比对电机功率变化意义重大。

如图 2.7 所示, 带 E1 和 E2 两台电机的功率分流式变速器在净功率分配中将发动机功率 (P_{VKM}) 的一部分通过机械分支得到高效率 η_{MECH} , 另一部分功率通过电功率分支获得较低的效率 $\eta_{E1} \times \eta_{E2}$ 。如图 2.7 所示, 一个行星齿轮装置或者啮合的行星齿轮机构将变速机构的输入功率 P_{VKM} 分开, 形成两个分支。系数 ε 为变速电机输入功率 (电机 E1 发电功率) 与发动机功率之比。

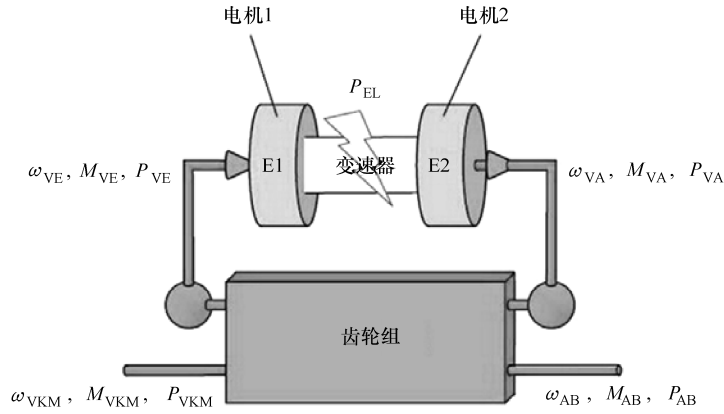


图 2.6 带有 2 个电机的功率分流驱动总图

ω_{VKM} —发动机的角速度 (rad/s) M_{VKM} —发动机的转矩 (N·m) P_{VKM} —发动机的功率 (kW)
 ω_{VE} —变速电机输入角速度 (rad/s) M_{VE} —变速电机输入转矩 (N·m) P_{VE} —变速电机输入功率 (kW)
 ω_{VA} —变速电机输出角速度 (rad/s) M_{VA} —变速电机输出转矩 (N·m) P_{VA} —变速电机输出功率 (kW)
 ω_{AB} —变速器输出角速度 (rad/s) M_{AB} —变速器输出转矩 (N·m) P_{AB} —变速器输出功率 (kW)

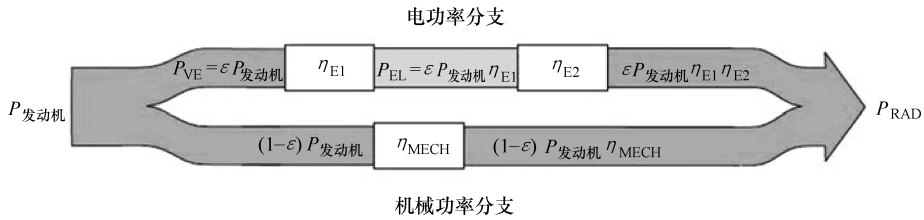


图 2.7 在驱动系统中，功率分配上的功率流

在电功率分支中，通过电机 E1 获得的机械功率被转换为电功率 P_{EL}

$$P_{EL} = \varepsilon P_{VKM} \eta_{E1} = P_{VE} \eta_{E1} \quad (2-1)$$

式中 P_{EL} ——在电功率分流中转换的电功率 (kW)；

P_{VKM} ——发动机的功率 (kW)；

P_{VE} ——电机 E1 获得的机械功率 (kW)；

ε ——功率分配比；

η_{E1} ——电机 E1 的效率；

η_{MECH} ——变速器的机械效率。

电机 E1 的发电功率与其获得的机械功率之比称为电机 E1 的效率 η_{E1} ，由于机械能转化为电能的过程中存在一定的能量损失，导致电机 E1 效率降低。电机 E2 将电能转换为机械能得出的电机 E2 的效率 η_{E2} ，这个过程中也存在能量损失。对于功率分支变速机构而言，两台电机之间转换的电功率 P_{EL} 与变速机构输入功率 P_{VKM} 之比 ε_{EL} 相当重要，原因在于能量转换后得到的电功率与机械驱动功率相关。这个数值同时可以衡量变速电机的负荷和确定电机的尺寸。

$$\varepsilon_{EL} = \frac{P_{EL}}{P_{VKM}} = \varepsilon \eta_{E1} \quad (2-2)$$

式中 ε_{EL} ——转换后电功率与发动机输出功率之比；

P_{EL} ——电力分流中转换的电功率 (kW)；

P_{VKM} ——发动机输出功率 (kW)；

ε ——功率分配比；

η_{E1} ——电机 E1 的效率。

变速器的整体效率可以简单地看作电气和机械效率以及各自所占比例之和。

$$\eta_{GES} = \left(1 - \frac{\varepsilon_{EL}}{\eta_{E1}} \right) \eta_{MECH} + \varepsilon_{EL} \eta_{E1} \quad (2-3)$$

式中 η_{GES} ——整体效率；

ε_{EL} ——转换后电功率与发动机输出功率之比；

η_{E1} ——电机 E1 的效率；

η_{MECH} ——变速器的机械效率。

由于各齿轮副效率较高，机械功率分支上的能量损失原则上小于电功率分支。整个动力系统达到高效率的关键是降低电机的能量损失以及使用逆变器，这样可以在保持较低电功率时，极大地降低能量损失。所以其目标是使与使用的齿轮组相关的因素 ε_{EL} 尽量保持在最低。从式 (2-2)、式 (2-3) 可以推算出机械效率为 99% (在行星齿轮机构中最少有一个主功率齿轮级)，而电功率分支的效率只有 72% (两台电机带整流器，每台电机的效率为 85%)，二者之差要小于 0.3，才能使变速器的整体效率达到 90%。也就是说 ε_{EL} 数值越小，变速器的整体效率越高。电功率减小造成电机尺寸变化，进而影响造价和变速器的结构。由于各个转换元件和各齿轮副的使用都会造成变速器的整体效率下降，因此机械零件应该越少越好。

图 2.8 中的功率分流变速器是最简单的一种，只有一组固定在驱动侧的行星轮机构和两台电动机，图中电机 E2 的输出轴和行星轮机构的输入轴固定在一起，这就是输出耦合或“输入分配”机构。两台电机 E1 和 E2 在此作为变速器的输入和输出。这一结构也应用在丰田普锐斯上。

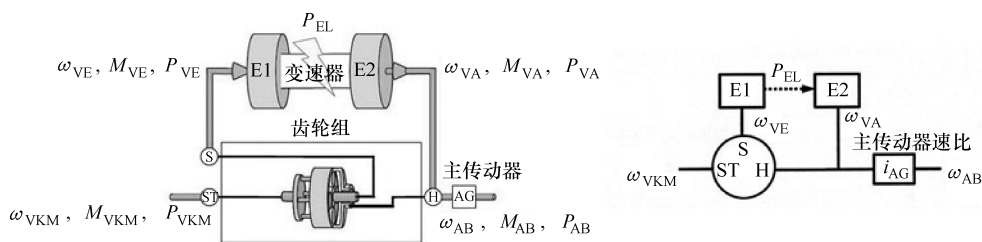


图 2.8 电功率分流变速器及输出端行星轮（输入分配）

S—太阳轮 ST—行星架 H—齿圈

图 2.9 所示是一个与图 2.8 相对应的结构，这是一个输入耦合机构，也称为“输入分配”机构。在汽车低速行驶时，这个结构当然需要达到高的电功率，因此更确切地说，该结构应用于超速传动系统。

为了加深理解，图 2.10 介绍了行星轮变速器的原理。行星轮变速器由一个太阳轮、多个行星轮和一个内齿圈组成。太阳轮和内齿圈从外侧轴接入变速器。每个行星轮既和太阳轮

啮合，又要和内齿圈啮合。所有行星轮的转动通过行星架，从而带动一个连接在外的轴，结构上而言，输出轴为空心轴。行星轮变速器有三个轴，这三个轴的角速度分别为 ω_1 （太阳轮）、 ω_2 （行星架）、 ω_3 （内齿圈），而行星轮的角速度 ω_4 不能从变速器外部直接测定。

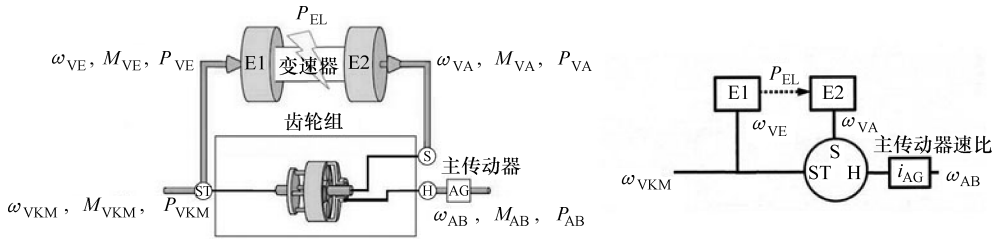


图 2.9 电功率分流变速器及输入端行星轮（输入分配）

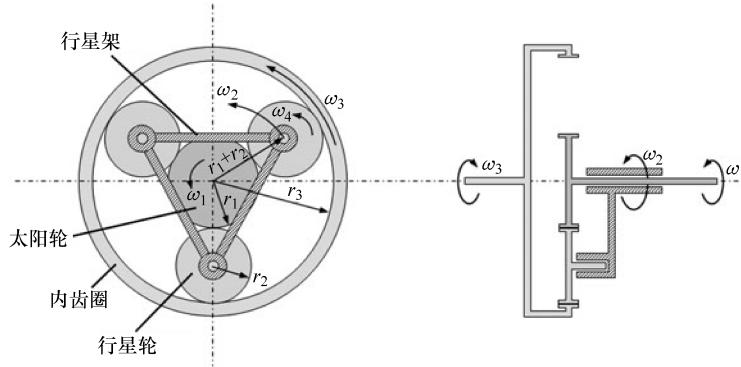


图 2.10 行星轮传动原理图

1. 几何关系及定义

齿轮半径: $r_3 = r_1 + r_2$

齿数: $z_3 = z_1 + z_2$

行星轮变速器的特征是固定速比 i_{Stand} ，其所指是在行星架固定的情况下，内齿圈轴和太阳轮轴的变速比，如式 (2-4)。固定速比是负数，因为内齿圈和太阳轮在行星架固定的情况下转动方向相反。

$$i_{\text{Stand}} = -(z_H/z_S) = -(z_3/z_1) \quad (2-4)$$

式中 i_{Stand} ——固定速比；

z_H ——内齿圈齿数；

z_S ——太阳轮齿数。

2. 运动学关系

两个齿轮在齿轮啮合点的速度必须一致。

太阳轮和行星轮: $r_1 \omega_1 = (r_1 + r_2) \omega_2 - r_2 \omega_4$

行星轮和内齿圈: $r_3 \omega_3 = (r_1 + r_2) \omega_2 + r_2 \omega_4$

两者相加得出 $-r_1 \omega_1 + 2(r_1 + r_2) \omega_2 - r_3 \omega_3 = 0$

或者 $-r_1 \omega_1 + (r_1 + r_3) \omega_2 - r_3 \omega_3 = 0$

$-z_1 \omega_1 + (z_1 + z_3) \omega_2 - z_3 \omega_3 = 0$

$$\omega_1 - (z_1 + z_3) \omega_2 / z_1 + z_3 \omega_3 / z_1 = 0 \quad (2-5)$$

式中 ω_X ——齿轮 X 的角速度 (rad/s);

z_X ——齿轮 X 的齿数。

根据式 (2-4) 中的固定速比可得出

$$\omega_1 - (1 - i_{\text{Stand}})\omega_2 - i_{\text{Stand}}\omega_3 = 0 \quad (2-6)$$

式 (2-6) 可以用列线图表示, 如图 2.11a 所示。

动力学方程式为:

在不计算惯量和摩擦力的情况下, 得出转矩之和为

$$M_1 + M_2 + M_3 = 0$$

根据行星轮转矩得出

$$r_1 M_3 = r_3 M_1$$

或

$$z_1 M_3 = z_3 M_1$$

两个动力学方程式可以通过线解图表示, 如图 2.11b 所示。

根据以上这两个转矩之间的关系得出

$$M_1 = -\frac{z_1}{z_1 + z_3} M_2 \quad (2-7)$$

$$M_3 = -\frac{z_3}{z_1 + z_3} M_2 \quad (2-8)$$

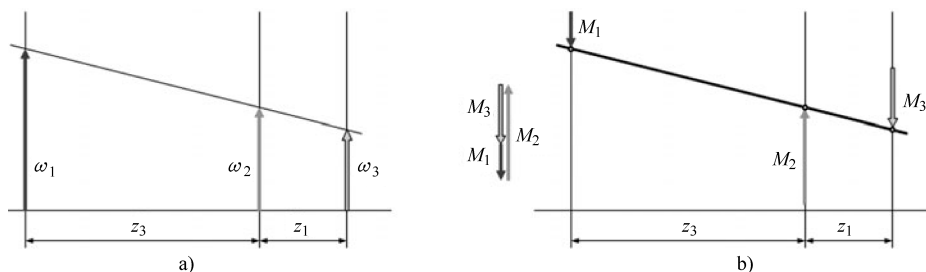


图 2.11 行星轮传动的运动学和动力学关系图形描述

这就是说, 太阳轮和内齿圈从行星架分配到的转矩比是恒定的。

行星轮变速器的转矩和转速通过杠杆类比法可以非常直观地展示出来。这样输入、输出和反应力矩以水平力的形式显示在杠杆上。杠杆的长度以及力的作用点对应相当于太阳轮和内齿圈的齿数。杠杆到参考线的距离分别表示各个齿轮的转速。图 2.12 表现的是其中一个齿轮静止或逆向旋转时转矩和转速的关系。

根据这些相关方法可以计算出每个运动链静止的转矩 M_1 和转速 ω_1 , 而每个运动链连接变速器上相应的轴, 如变速器输入轴和输出轴。齿轮组的变速比 i ($i = \omega_{\text{VKM}}/\omega_{\text{VA}}$) 根据其中一个轴的转速被无级变更。根据电机转矩 M_1 和发动机转矩 M_2 之比恒定, 得出电功率 P_{EL} 和输入功率 P_{VKM} 与变速比成反比的线性关系。

图 2.13 表述的是丰田普锐斯在纯发动机工作情况下, 也就是说完全没有电池充放电的情况下, 电功率 P_{EL} 和输入功率 P_{VKM} 之比依赖于齿轮组的变速比 i 。P 点表示的是变速电机的输入轴也就是电机 E1, 在此变速比的反比值 $1/i = (Z_H + Z_S)/Z_H$ 增大。丰田普锐斯: 变速比反比 $1/i = 1.38$, 固定变速比 $i_{\text{Stand}} = Z_H/Z_S = 78/30 = 2.6$ 。

此处出现在电功率分流中的最小功率。在这种情况下, 在变速器输入处的电机 E1 只产

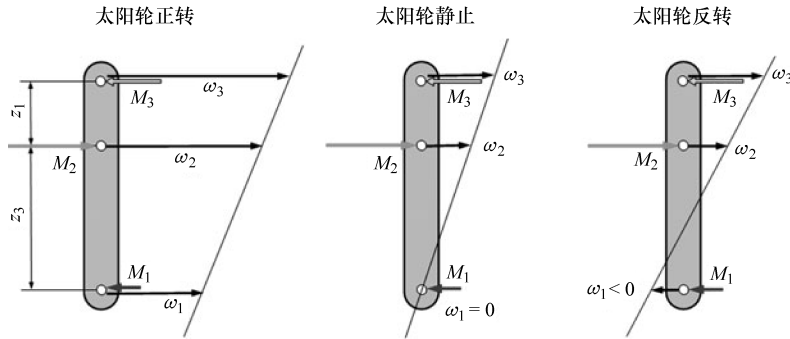
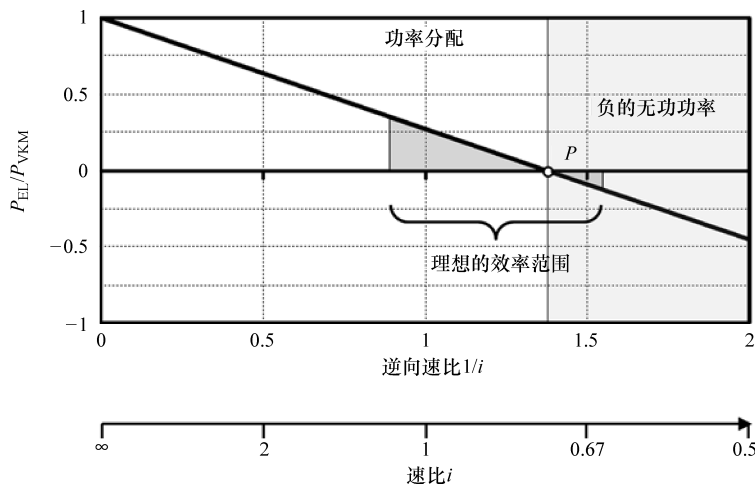


图 2.12 用杠杆模拟来描述行星轮传动的转矩和转速

生一个等于发动机输出转矩 M_{VKM} 的支撑转矩 M_{VE} ，该值使 $(i_{Stand} + 1)$ 变小。

图 2.13 电功率 P_{EL} 与输入端功率 P_{VKM} 的比例 ε_{EL} (丰田普锐斯车型, 设有能量交换, 带电池)

变速比的值离 P 点 (纯机械变速) 越远, 其通过并不高效的电功率分支就必须转换更多的电能。这就同样需要知道相应的电机功率, 得出电动机的重量和需要的空间。 P 点上方表示电机 E1 反方向转动, 电机功能从发电转变为机械驱动, 这样能量从机械功率分支到电功率分支, 在变速器中循环, 也就是所谓的无功功率, 对整体效率带来负面影响, 见图 2.14。

这就必须调整变速器, 使汽车尽可能在大部分行驶状态的功率保持在 P 点附近。因为不可能在其他范围进行调节, 所以在具体情况下放弃使用单行星轮机构, 而使用双行星轮机构传动, 这样的结构使两台电机在工作范围内的转速保持为零, 如图 2.15 和图 2.17 (混合分配) 所示。尤其是在行星轮组啮合的情况下, 杠杆类比法可直观地表现出各种转矩之间的关系, 见图 2.16。两组齿轮通过连杆连接, 或与操纵杆连接。图 2.17 显示了取决于变速比的功率分配。

图中 P_1 和 P_2 点表示两台电机中一台转速为零, 功率 P_{EL} 达到最小值。两点之间变速电机的功率小, 两点之外其功率可达无穷大。图 2.17 中明显表示出, 在整体传动中, 一个带

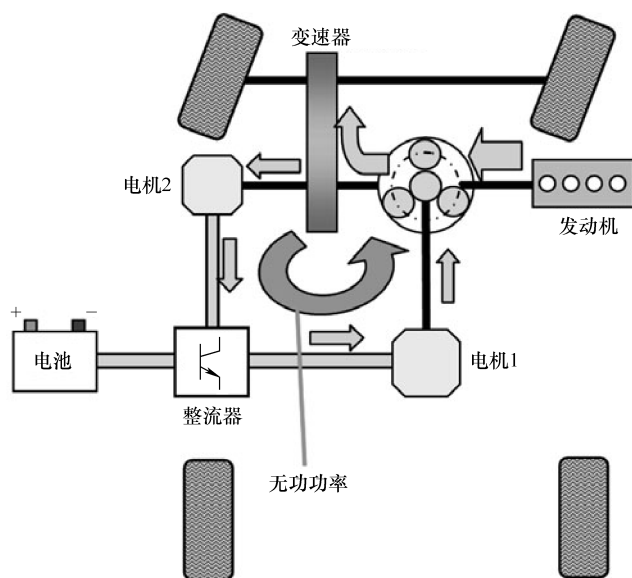


图 2.14 丰田普锐斯动力总成以及无功功率流程图

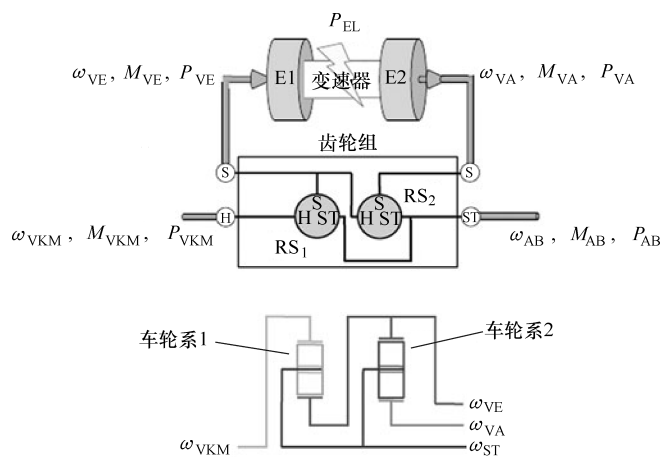


图 2.15 带双行星轮传动机构的功率分流式变速器

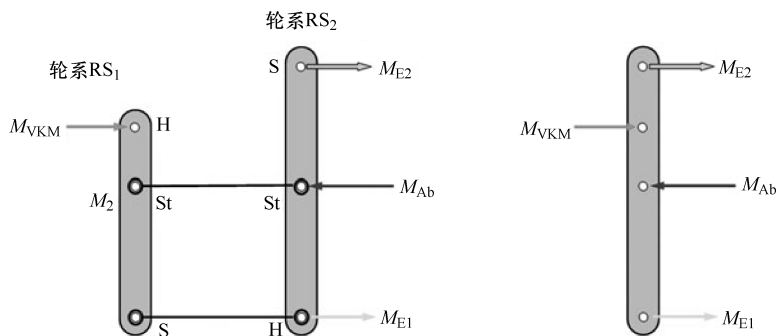


图 2.16 带双行星轮传动机构的功率分流式变速器杠杆示意图

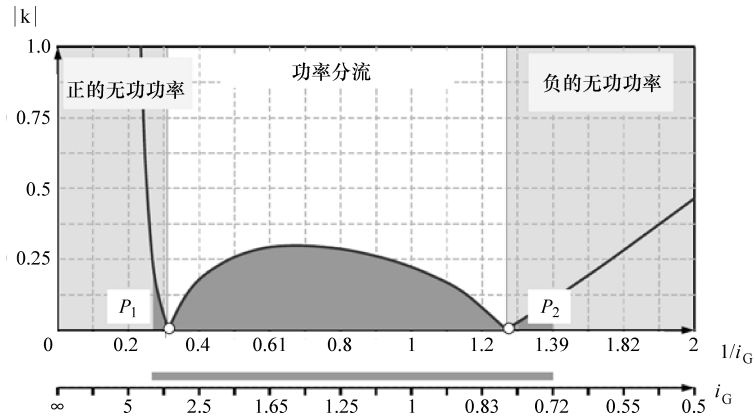


图 2.17 带双行星轮的电功率分流变速器的功率分配图（与变速器的速比 i_G 相关）

两个啮合行星轮机构的齿轮组不足以使电功率与发动机输出功率之比 ε_{EL} 在整个传动比范围内小于 0.3，所以无法保证变速装置的高效率。尤其是在汽车起步时，需要一个无穷大的变速比，却只能通过增加电功率达到，因此传动效率低。

正因为如此，才需要使用换流元件，使工作范围分为两个无级变速范围，例如图 2.18 所示的双模式变速装置。在模式 1 中变速比高，所对应的牵引力大，而模式 2 中变速比低，如图 2.19 所示。

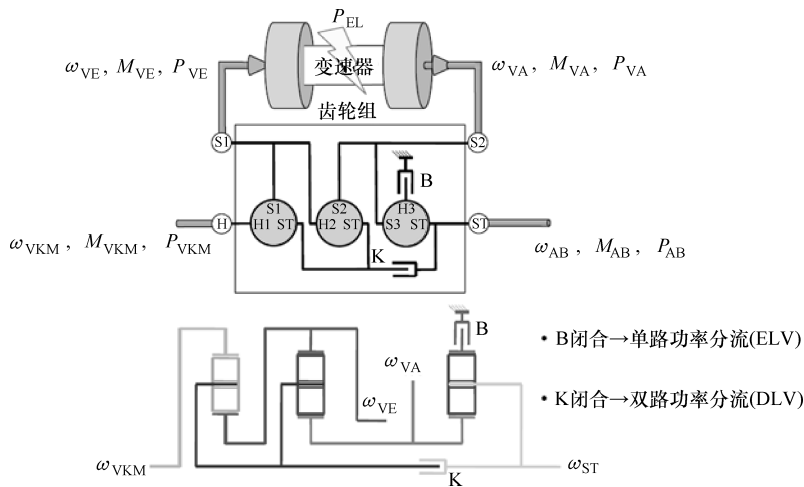


图 2.18 带有三套行星轮和两个换流元件的双模变速器

目前，通用汽车公司已经开发出用于串联式混合动力汽车的双模式变速系统，戴姆勒和宝马共同开发的双模式混合驱动装置中，除两个可变功率分支工作模式外，还有机械变速模式，机械变速分为 4 个档位，每个档位有固定的变速比。这一技术降低了对电机的要求，因为串联传输的能量在单一工作范围内可以保持在较少值，同时总体上减少在效率低的电功率分支中的功率能量传输。在城市交通中和频繁起停时，汽车可以只通过两台电机或发动机，甚至通过同时采用两种变速模式行驶。

在机械和整体尺寸方面，双模式变速器跟传统自动变速器大小接近，但是双模式变速器可以无级变速，或者有 4 个变速比固定的档位。一个电子控制单元持续对整个混合动力系统

进行协调,使发动机在每个负荷级找到最佳工作点。该变速器特别适用于采用大型发动机的混合动力汽车,如拖车和载货汽车。在汽车匀速高速行驶或超车以及爬陡坡时,双模式技术优势显著。发动机保持运转,因为通过全混合技术,发动机大小和工作方式没有额定值作为限制。图 2.20 所示为结构设计。

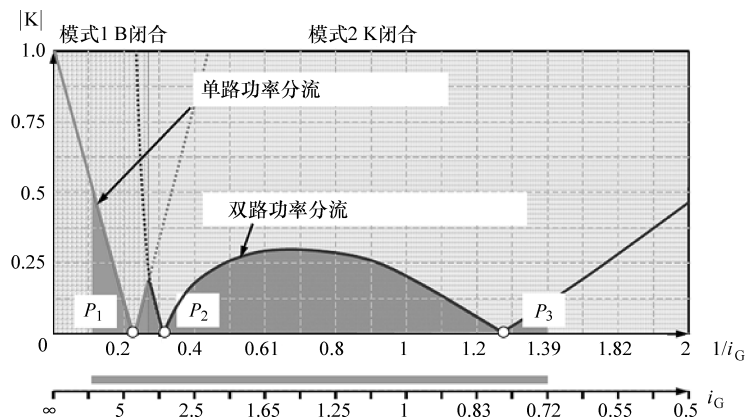


图 2.19 双模式变速器的功率流（带有 3 套行星轮和 2 级换档机构）与变速器速比相关
2 台紧凑型电机(A, B)

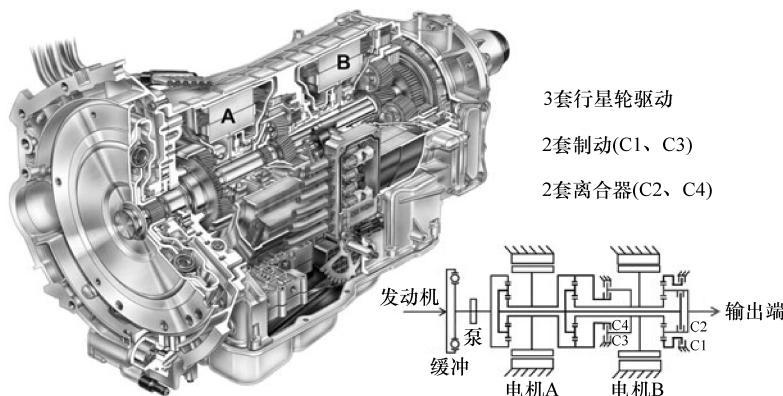


图 2.20 混合驱动部分作为无级变速（带有 4 档可选固定速比）

3. 变速档位

4 个带固定变速比的档位加 2 种无级变速模式，一共 6 种工作模式：

- 1) 功率分支无级变速模式 1（输入分配模式）的变速范围在从发动机起动到第 1 固定档位，再到第 2 固定档位之间。
- 2) 复合无级变速模式 2（复合分配模式）的变速范围在第 2 固定档位和以上固定档位。
- 3) 变速比固定的第 1 档位，这一档位时，两台电机作为驱动装置，或者回收制动能、收集减速和滑行所获得的能量，储存能量。
- 4) 变速比固定的第 2 档位，这一档位时，电机 B 主要用于加速/制动。
- 5) 变速比固定的第 3 档位，这一档位时，两台电机同时用于加速/制动。
- 6) 变速比固定的第 4 档位，这一档位时，电机 A 主要用于加速/制动。

以下 6 点适用于不与电池进行能量交换的各种工作模式。介于充放电循环就意味着额外的能量损失，发电机发的电往往直接驱动电动机。

a) 输入分配式。最简单的无级变速模式就是输入分配式，这一点在本章一开始就提到过。如图 2.21 所示，双模式全混合驱动装置实现输入分配，制动器 C1 固定。

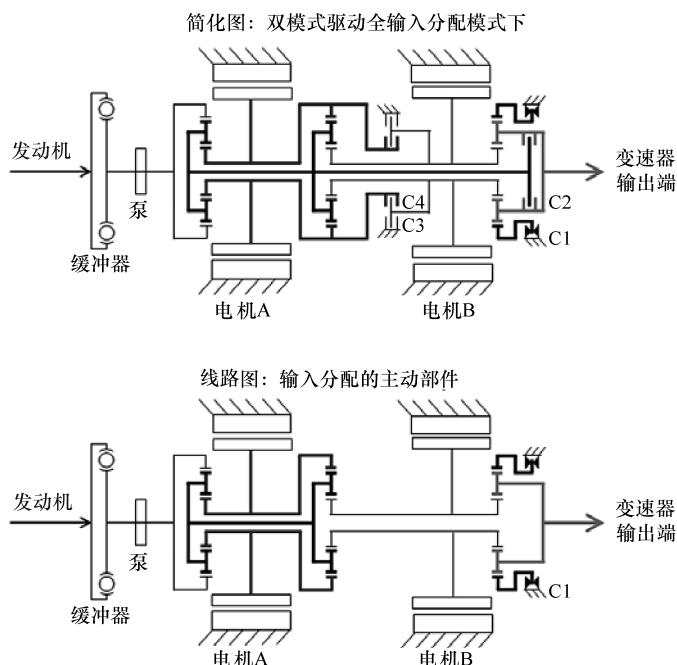


图 2.21 输入分配的规则

b) 复合分配式。复合分配式无级变速更为高级。两个机械点之间的部分是工作范围，因为机械功率分支凭借其高效率传递绝大部分从发动机传递来的功率，只有有限的功率通过电功率分支传递。如图 2.22 所示，带 4 个固定档位的双模式全混合驱动装置实现了复合分配

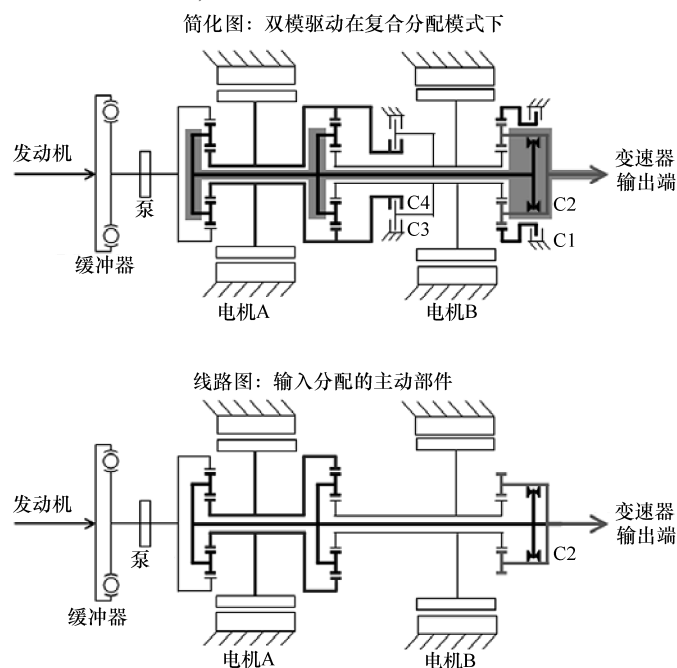
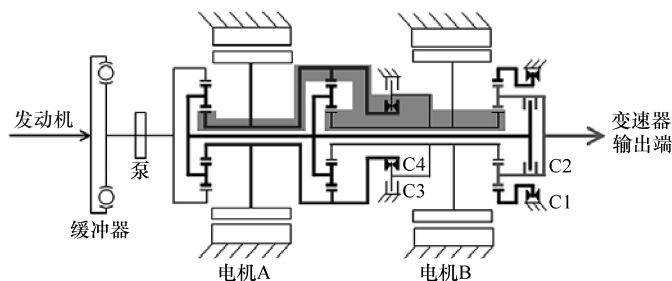


图 2.22 复合分配的规则

配式，在这种模式下离合器 C2 是闭合的。

c) 图 2.23 显示的是变速比固定的第 1 档位。该图的上半部分是整个变速系统，下半部分是简化图解。1 档位，制动器 C1 固定，离合器 C4 闭合。两台电机作为驱动装置，或者回收制动能、收集减速和滑行所获得的能量，储存能量，但两台电机工作不影响变速比。

简化图：双模式驱动1档



线路图：1档的活动部件

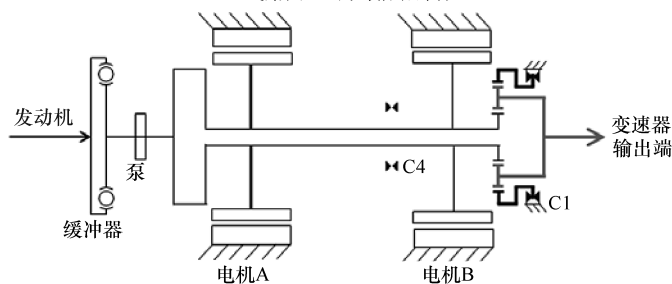
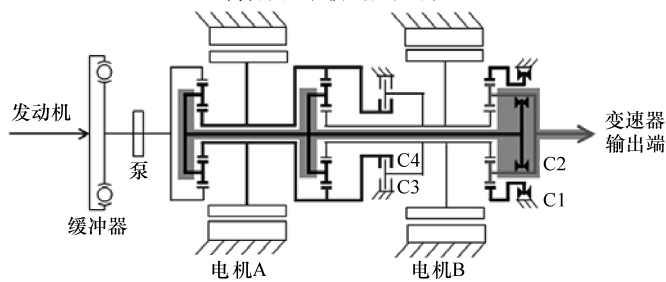


图 2.23 1 档：制动 C1 固定，离合器 C4 闭合

d) 图 2.24 显示的是变速比固定的第 2 档位。制动器 C1 固定，离合器 C2 闭合，在这

简化图：双模式驱动2档



线路图：2档的活动部件

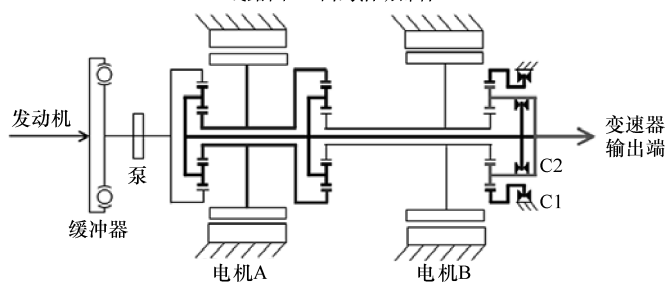


图 2.24 2 档：制动 C1 固定，离合器 C2 闭合

一档位时，一台电机（Motor B）主要用于加速/制动，不影响变速比。

e) 图 2.25 显示的是变速比固定的第3档位。离合器 C2 和 C4 闭合。两台电机可以作为驱动装置，或者回收制动能、收集减速和滑行所获得的能量，储存能量。两台电机并不影响变速比值为 1，即直接档。

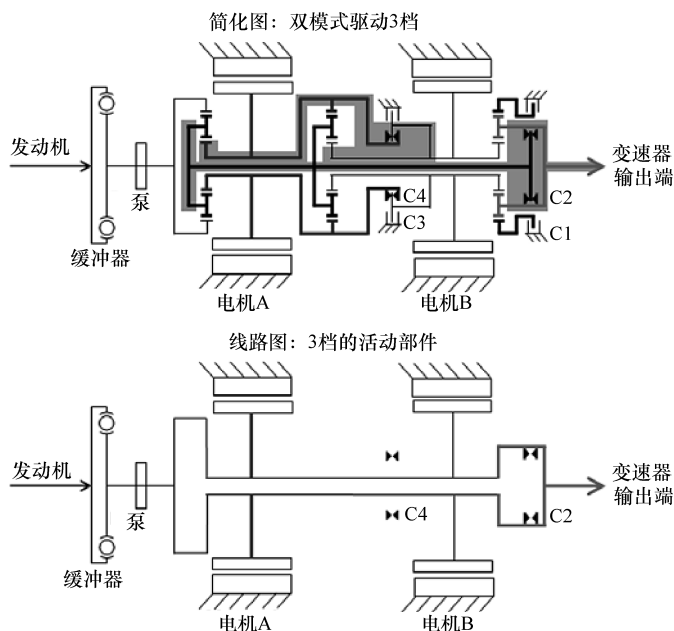


图 2.25 3 档：离合器 C2 和 C4 闭合

f) 图 2.26 显示的是变速比固定的第4档位。制动器 C3 固定，离合器 C2 闭合，在这一档位时，一台电机（Motor A）主要用于加速/制动，不影响变速比。

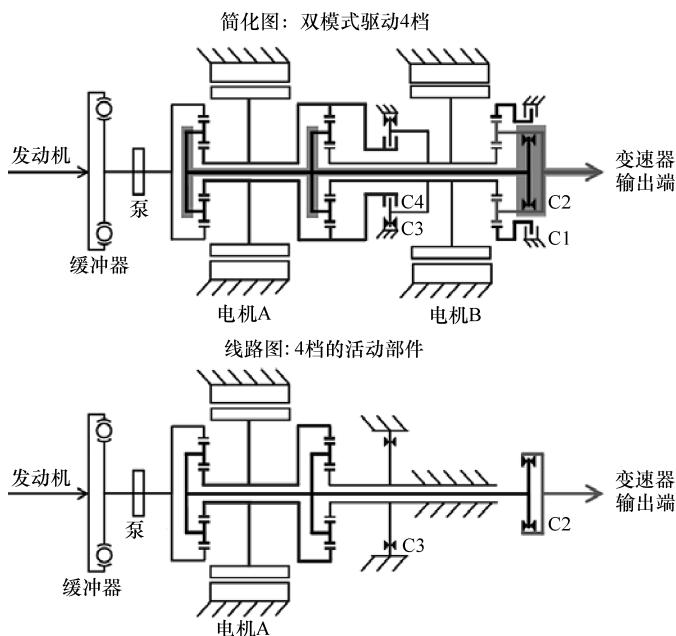


图 2.26 4 档：制动 C3 固定，离合器 C2 闭合

图 2.27 对各个离合器的工作范围进行了总结。可参考选择最节能的工作模式，以求更完美地实现从适当的滑行到挂拖车上坡行驶等各种要求。

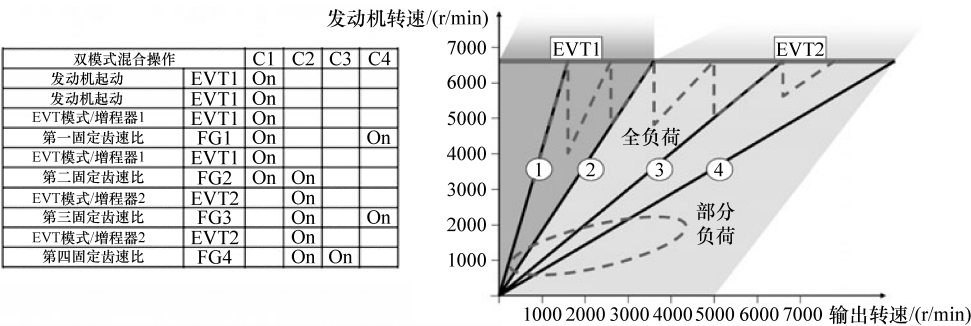


图 2.27 离合器和驱动极限

双模式变速器技术的一个巨大的优势在于，除通过电功率分支传递有限的功率和 4 个固定的机械变速比之外，与单一模式变速器相比，两台电机的尺寸得以减小。

关于这一系统的更多信息，包括可能的操作策略和潜力，参见本书第 6 章奔驰 ML450 混合动力以及宝马 X6 混合动力。

另一个功率分配混合驱动系统的例子是李斯特发动机及设备公司（AVL）研发的通用混合动力系统（UHS，Universal Hybrid System）。前面提到过，由于能效的关系，应该避免多次能量转换，让机械能转换直达车轮。研究结果是将大功率发动机与小功率电机组组合效果最好，进而使发动机在高负荷和低转速的情况下稳定或半稳定工作，这一点只能通过无级变速实现。

AVL 公司的 UHS 混合动力系统中，仅使用一组行星轮传动达到无级变速，并将功率分配到机械功率分支和电功率分支中，再在输出轴再次结合。该系统需要两台电机来实现无级变速和保持发动机稳定工作。在需要的时候，电机 EM1 调节功率（转矩），电机 EM2 输出轴转速。此外，这个系统含 4 个离合器，形成一个出乎意料的多种驱动结构，如图 2.28 所示。

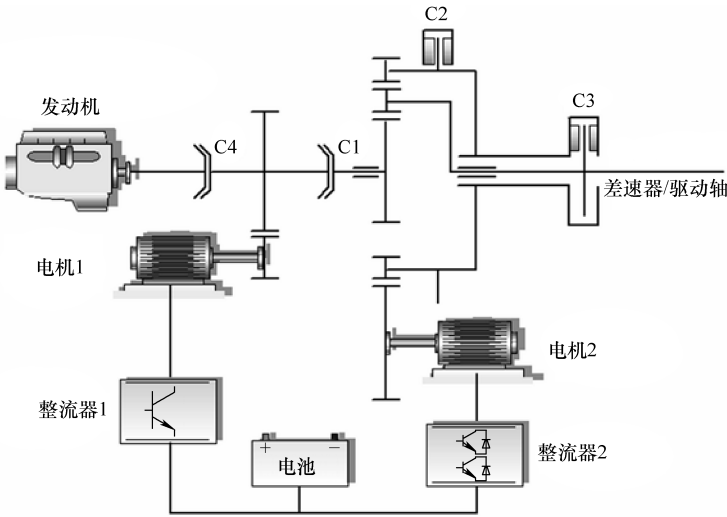


图 2.28 具有离合器 C1 至 C4 的 AVL - UHS 驱动系统图

这个结构下，可以通过简单的切换离合器形成不同的电动和混合动力汽车的结构，表 2.2 中介绍了不同的工作模式。

在城区内行驶时，电机 EM1 提供两个驱动档。在城市内快速路段加速和有更高的功率要求时，行星轮机构可以被锁住，电机 EM2 也可以提供功率。离开零排放区，发动机起动，三台机器在 CVT 无级变速模式下同时工作，尽可能保持舒适性并提高能效。这时，发动机既可以稳定地工作，也可以限制性动态工作。在高速公路上行驶时，行星轮机构被锁止，驱动功率直接机械式传送至车轮，实现低油耗。

表 2.2 UHS 混合动力系统的重要工作模式

模式	C4	C3	C2	C1	备 注
0	x	c	c	x	停车状态
1	o	o	c	c	1 档：通过电机 EM1 纯电动行驶
2	o	c	o	c	2 档：通过电机 EM1 和 EM2 纯电动行驶
3	o	c	o	o	串联混合动力驱动，发动机和电机 EM1 作为充电装置，EM2 作为驱动电机
4	o	o	c	c	发动机和 1 档结合，电机 EM1 可以增加瞬间功率或给电池充电
5	o	o	c	c	并联混合动力驱动，发动机和电机全部工作，行星轮作为无级变速器
6	o	c	o	c	发动机和 2 档结合，电机 EM1 和 EM2 可以同时增加瞬间功率或给电池充电
c 表示离合器闭合；o 表示离合器断开；x 表示任意档位					

最著名的采用功率分流式混合动力的汽车有丰田普锐斯、雷克萨斯及通用汽车公司、戴姆勒－克莱斯勒和宝马联手打造的双模式混合动力概念车。详细内容参见第 6 章。

2.4 微混合动力

这一类混合动力汽车与常规汽车相比，只有一些小小的改动，简而言之，就是一个效率更高的起动装置或者一个传动带式起动机/发电机取代常规起动装置。图 2.29 是传动带式起动机/发电机在奔驰 A/B 车系上的应用。

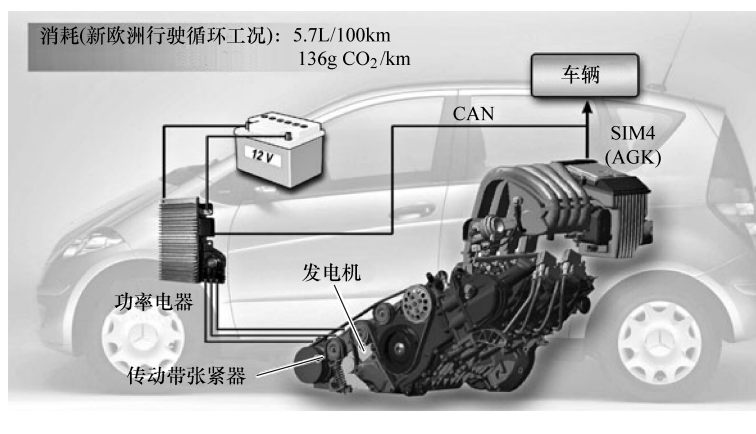


图 2.29 传动带式起动机/发电机系统在奔驰 A/B 车系上的应用

在汽车静止的时候，如红灯或堵车时，发动机停止工作。当车辆重新起动时，发动机自动起动，无明显延迟（起/停系统或怠速熄火自动控制装置）。

微混合动力跟纯起/停系统的区别在于能够部分回收制动产生的能量（受制于该系统极有限的电功率）。在此，一个能量管理系统是必不可少的。宝马公司车辆通过制动能量回收系统在松开加速踏板或制动踏板时立即回收动能，并储存在电池中。车载电网的设计考虑到滑行时发电机的发电量较大，电路的电压不是常规的 12V，而是以 15V 取代，如图 2.30 所示。

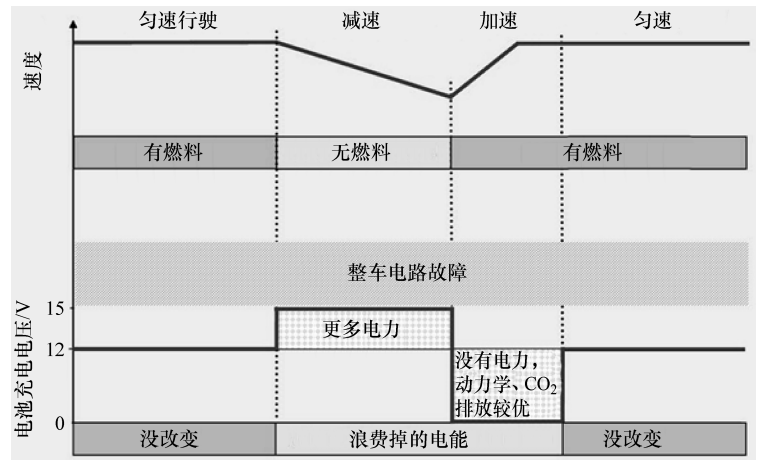


图 2.30 宝马公司的制动能量回收系统中的智能化发电机控制

在没有采取任何额外复合措施的情况下，更高的电流会明显干扰车载电网的工作。一个电调节装置的作用是在产生多余的电流时，使电池保持可充电状态。此外，电机整体输出功率为汽车加速提供动力支持，因为这种行驶状态下电池的电能通过车载电网为电机供电。发电机在电池充电状态不足时才重新开始工作。具有智能电池传感器的控制系统对上述工况进行监控，同时保证安全功能所需的电能。其功能还包括防止如电池完全放电等情况下出现的超负荷供电，降低使用保持车内舒适度功能的用电。智能发电机调节装置将电能能耗降低 3%。

在汽车起步过程中，必须确保在车载电网中不会出现电压干扰，也就是说车载电网必须得到支持。负责这一功能的是一个 DC/DC 转换器或一块备用电池，如图 2.31 所示。这样一来在起步的时候，起动机/发电机和起动电池所属的电路通过去耦装置与剩下的车载电网断开，这就是备用电池的功能。

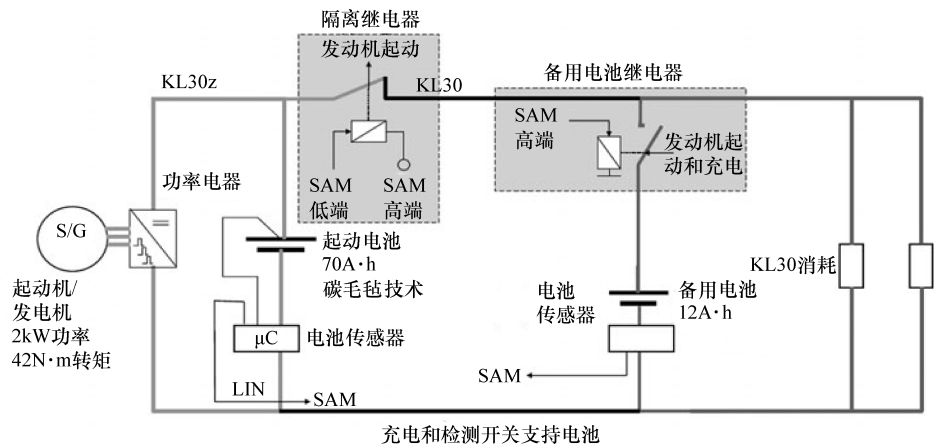


图 2.31 带支持电池的整车电能支撑方案

车载电网很少采用第二种电压，即 42V 的电压。微混合动力系统是最初级的动力混合。车辆的生产工序、重量和造价都在控制范围内，在城区内行驶节能却不超过 10%。图 2.32 是纯起/停系统和微混合动力系统的对比图，图 2.33 是微混合动力汽车土星（通用公司）。

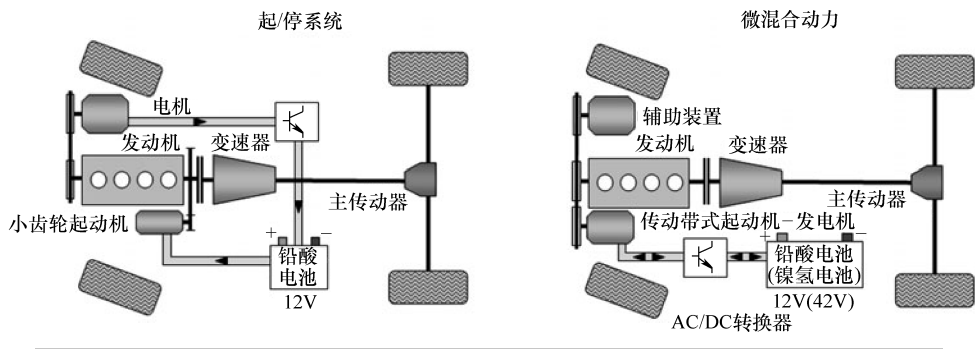


图 2.32 起/停系统和微混合动力的比较

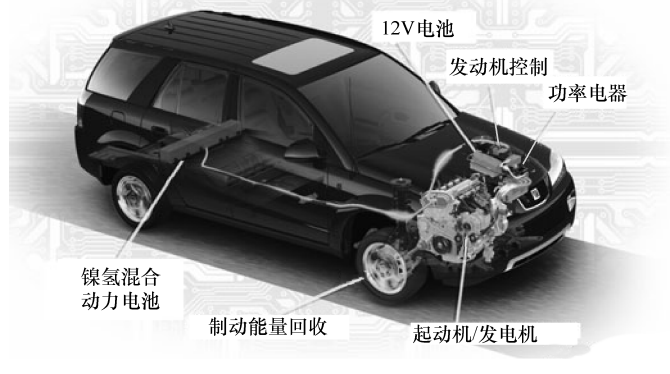


图 2.33 土星微混合动力汽车

2.5 中度混合动力

一般情况下，微混合动力系统中的电机位于发动机和变速器之间的曲轴上。这一结构一般是曲轴—起动机—发电机（CSG）构成。除了起/停自动控制系统和制动能回收系统之外，在车辆起步和加速阶段，该混合动力系统还利用一个所谓的增强功能对发动机进行支持。通过相应的电机和高压电池，电压范围提升到 42 ~ 150V。电压升高导致功率增加，既能提高制动能回收的效率又能缩短起动时间。原则上，载荷点的移动可以降低能耗和减排。图 2.34 所示是一个中型混合驱动系统的部件配置和电路结构。图 2.35 是雪铁龙 C4 HDi 混合动力技术的详细图解。

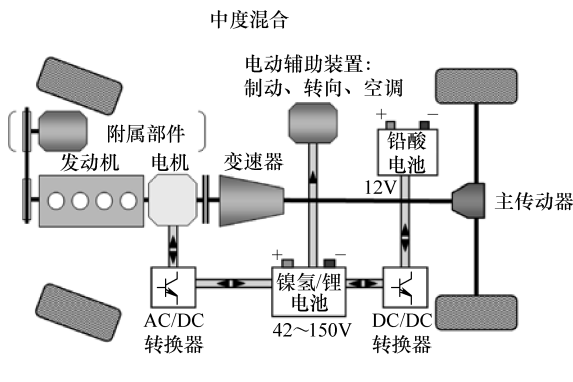


图 2.34 中度混合动力部件配置和电路结构

图 2.35 是雪铁龙 C4 HDi 混合动力技术的详细图解。

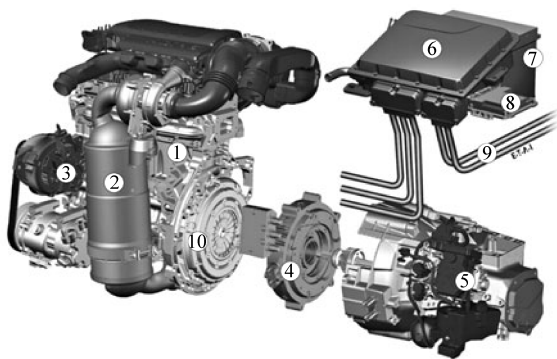


图 2.35 雪铁龙 C4HDi 混合动力的中度混合方案

- 1—1.6L 柴油发动机 (66kW) 2—DPF 柴油颗粒过滤 (PSA 专利) 3—起/停系统
4—电机 (16kW) 5—自动换挡变速器 (6 档) 6—功率电器 (整流器和 DC/DC 转换器)
7—12V 电池 8—传动链管理控制器 9—高压电缆 10—离合器

2.6 全混合动力

全混合动力就是既可以使用纯电动或发动机驱动,也可以使用复合式驱动。与中度混合动力汽车相比,对结构进一步改良是必不可少的。因此必须有选择地额外增加一台离合器、一台或多台大功率的电机以及一块大容量高压电池。高压电池需要具有大的功率,迅速储存制动过程中产生的绝大部分电能。

由于全混合动力消耗的电功率高,在加速时虽然转速低,但产生的转矩大。这属于典型的电机转矩特征,转速越低转矩越大。在尽量节能的前提下,智能工作模式配合发动机可以实现良好的加速性能和极大的驾驶乐趣。当然,该系统工艺更为复杂,造价更为昂贵。

全混合动力汽车的车载高压电池电压为 200 ~ 400V,而常规车载电网电压为 12V。一般情况下,车辆照明和常规起动装置无需过高的电压。图 2.36 所示为全混合动力驱动技术与其附加离合器以及系统电路机构。

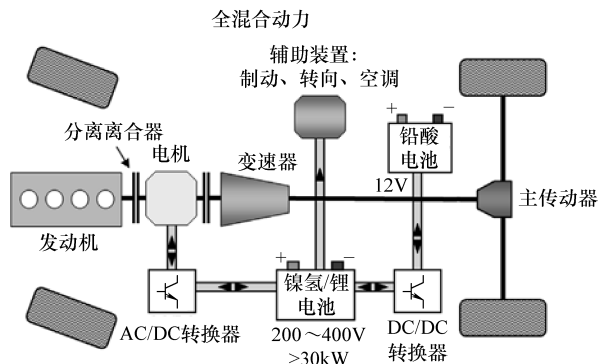


图 2.36 全混合动力的部件配置和电路结构

2.7 插电式混合动力

插电式混合动力汽车或称插电式混合动力电动汽车，是混合动力技术的一种，其车载电池可以通过外接电源充电。一般情况下，插电式混合动力汽车所使用的电池大于纯混合动力汽车的电池。这种混合模式介于全混合动力和电动车之间，个别情况下由一辆前面所介绍的混合动力汽车加载一块电池和充电装置，构成插电式混合动力汽车（如丰田普锐斯），如图 2.37 所示。

插电式混合驱动模式主要还是电动机驱动，称为混合电动，所以第二种驱动模式（即增程器）有不同的选择。目前的车型和样机通常使用常规发动机作为第二种驱动模式。当然，未来会出现别的方案，例如用燃料电池作为驱动。



图 2.37 插电式普锐斯概念车

插电式混合动力汽车融合了电动汽车和汽油车的优势：短途行驶和城市交通环境中，使用电动模式噪声小、零排放、节省电池电量，当电池电量耗尽时仍可通过第二种驱动模式（如发动机）行驶，续航能力理想。劣势在于造价高，如果使用大容量电池，造价比独立的混合动力汽车还要高。

原则上，插电式混合动力汽车向电动汽车时代又迈进了一步。插电式混合动力汽车搭载发动机作为增程器的研发是合乎逻辑的一步，这样一来，电池续航能力无需太强，成本可以控制，而发动机根据不同的结构保证车辆达到所需的功能。各种研究表明，到 2025 年搭载增程器的高度电动化汽车将占据重要地位，如图 2.38 所示。目前几乎所有汽车都不同程度

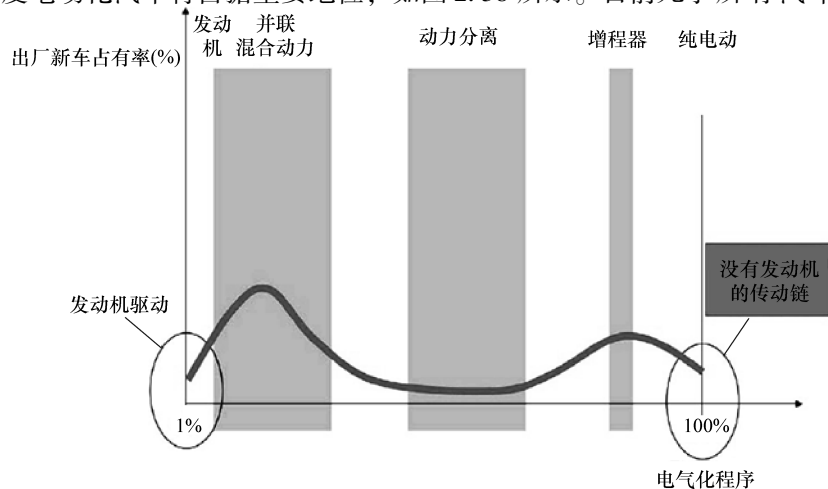


图 2.38 电气化程度（2025 年）

地采用混合动力技术，而微混合动力汽车以其高性价比的优势成为行业重心。当前占主导地位的全混合动力车大多采用功率分流设计，将会被搭载强大增程器的车辆取代。

这种覆盖率要求广泛的用户基础，比如在德国必须达到 85% 的汽车单程可行驶 30km，就是说约等于 45% 车辆的每日平均行驶里程，如图 2.39、图 2.40 所示。

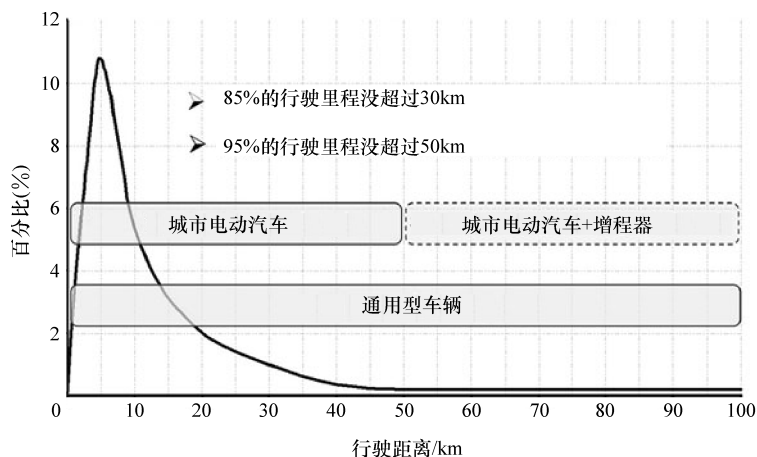


图 2.39 在德国单台汽车的行驶里程分布

纯电池驱动要达到 100km 的续航里程，必须接外网充电，而且根据电池的容量和充电状态会持续长达几个小时。在电池充电装置的帮助下将电网的 220V 交流电转换为高压电池所需的高压直流电进行充电。对于用户而言，这一方案具有成本优势，可以利用夜间电价低的时候充电。图 2.41 是某款插电式混合动力的汽车的电气结构。图 2.38 所示为预计 2025 年汽车行业电动化程度。

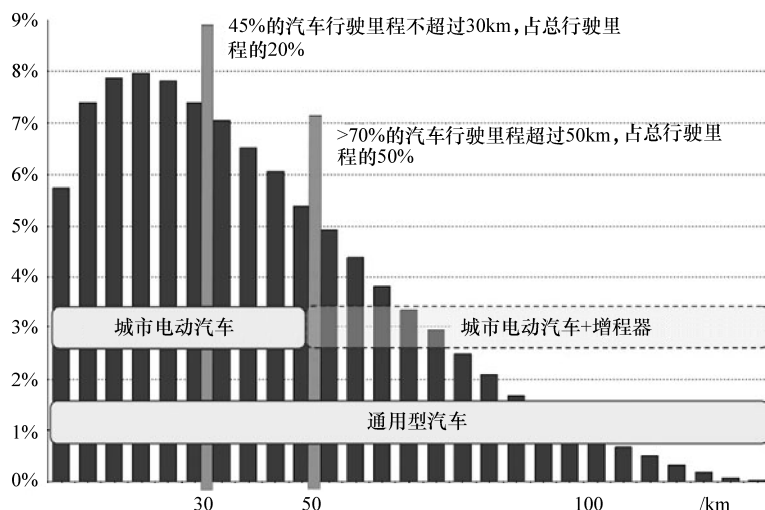


图 2.40 每日总行驶里程的分布

插电式混合动力汽车，例如重新设计的雷诺 Kangoo Elect'road 及其下一代，雷诺 Kangoo Cleanova 二代，这两款汽车有一个特别设计的驱动系统，车速 80km/h 以下时使用串联式，车速超过 80km/h 时并联模式被激活。该驱动系统配备 60kW 的电机和 40kW 的发动机，可

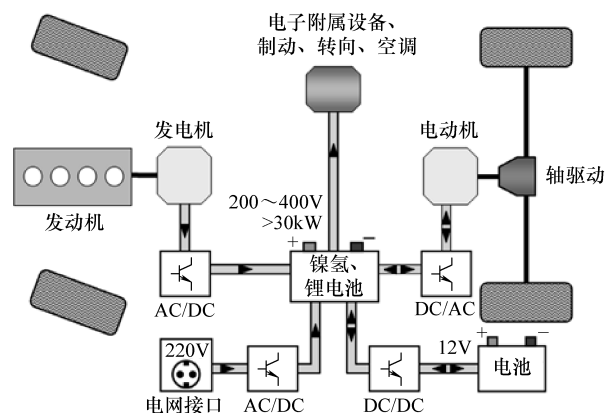


图 2.41 插电式混合动力车辆的电气结构举例

以实现比常规汽车更好的性能。戴姆勒-克莱斯勒有一款由小型运输车 Spinter 发展而成的插电式混合动力汽车。

2007 年，通用汽车公司在国际汽车博览会上展出了欧宝 Flextreame 和雪佛兰 Volt 插电式混合动力车（“看，灵动未来”作为参展口号），参见第 6 章。大众 twinDrive（双驱动）是极具创新的一款车，作为组合混合动力汽车，其以电驱动为主的，同时兼备串并联工作方式，参见第 6 章。

配备 4 台轮毂电机的沃尔沃 Recharge 混合动力汽车，也值得一提。这 4 个轮毂电机甚至代替了制动器，如图 2.42 所示。

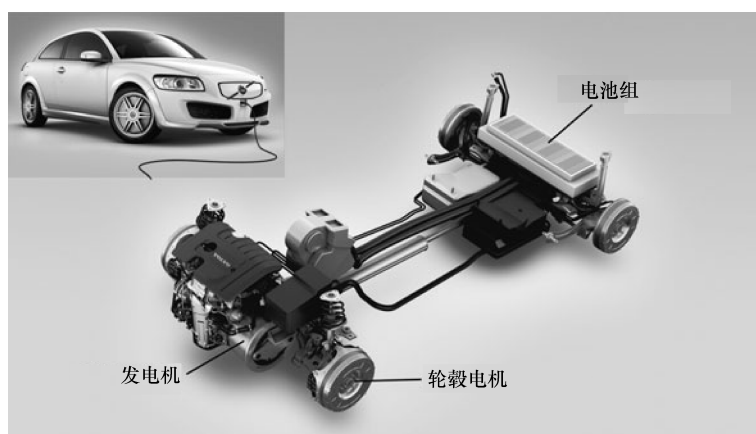


图 2.42 沃尔沃 Recharge 混合动力汽车的动力总成

到目前为止，介绍的插电式混合动力汽车与常规混合动力相比，电动程度高、电池容量大以及车速中电动驱动比例大。相对而言，机械驱动比例可以减少。另一种方案是一个纯电动车的配置。该方案放弃使用机械驱动装置，而是通过一个一体化增程器对再充电装置进行独立供电。其优势在于，这种装置在汽车内部的安装位置灵活，在单点工作下发动机可自由设置和优化。除发动机以外，两冲程发动机、旋转式活塞发动机、燃料电池等都可以作为增

程器。图 2.43 所示为 AVL 公司的用转子发动机（又称汪克尔发动机）设计的增程器模型。图 2.44 和图 2.45 所示为该增程器所配的转子发动机。

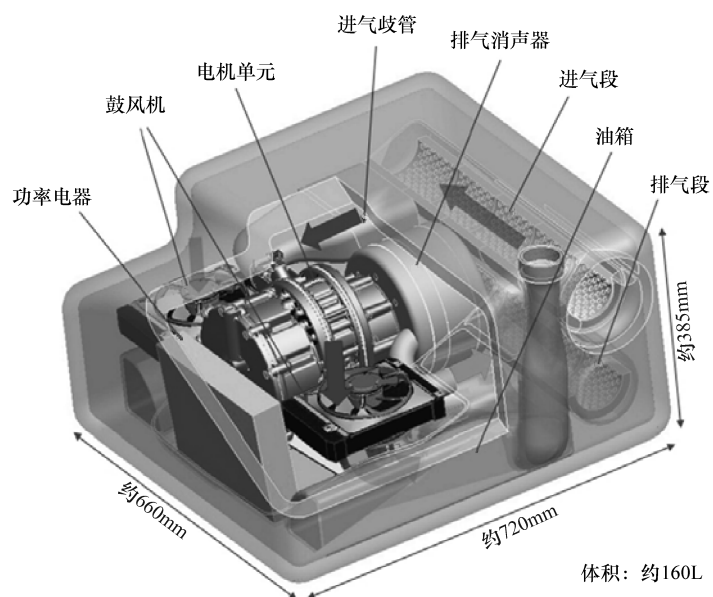


图 2.43 增程器（GS20）——汪克尔发动机模式

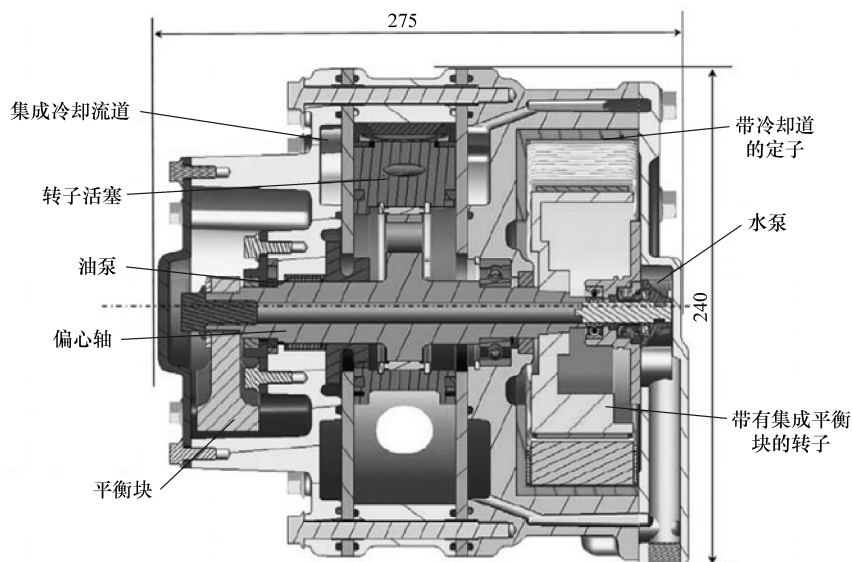


图 2.44 增程器（GS20）——汪克尔发动机

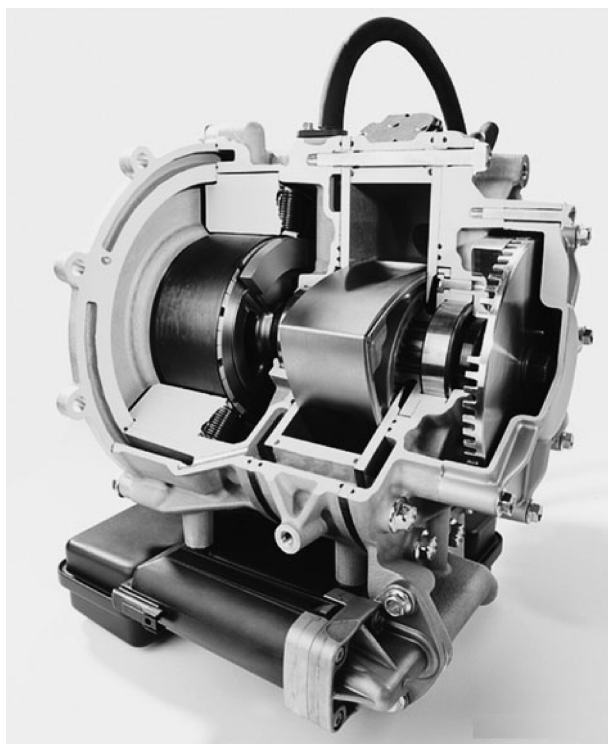


图 2.45 AVL 公司的带汪克尔发动机的增程器剖面图

2.8 小结：混合动力系统

总而言之，串联和并联式混合动力概念可以说是各有特点，最终还是要根据驾驶特点和诸如污染物排放法规和税法等外部相关条件来选择。

复合式混合动力集中了并联式和串联式的优点，但是更为复杂，而且因为切换和选择，在技术上难以调节。

从混合程度和分类上来看，起/停系统（或称怠速熄火系统）前景光明，在中期来说会成为常规汽车的标配。微混合动力技术由于电池功率和容量的局限性，增值不明显，但是这一类混合动力车辆在价格方面很受欢迎，因此是最容易实现的混合动力技术。

中度混合动力较微混合动力而言造价稍高，但市场占有率潜力大。这一驱动形式可以通过一定的投入与现有车辆技术相结合，而全混合动力或需要更多研发投入。中度混合的最简单的方法就是所谓的起动机/发电机，该技术把起动装置和发电机结合在一起，并与动力总成相连接。

全混合动力需要额外的离合器或者电机，并且需要相对应更高的电功率，因此具有很大的节能减排潜力，而且可以实现额外的功能，如电动行驶。

插电式混合驱动更加省油，电池不再是通过发动机工作充电，而是通过电网充电。在这方面，电池容量增大，成本也因此大增。在适当的续航里程下，普通的行驶距离可以完全由电力驱动，而发动机只用于增程行驶。

图 2.46 将各类混合动力应用的省油潜力、驾驶乐趣和成本进行了比较。成本上升首先是因为能量存储装置装机容量越来越大。图中阴影部分表示在降低成本、改进技术和扩大产量三个方面的潜力。在降低油耗的潜力和提高驾驶乐趣上面需要作一定的权衡。混合动力技术不断朝着降低油耗的方向发展，而驾驶乐趣就无法提高，反之也是如此。图 2.46 中显示在中档车以下，混合动力部分为 15 ~ 20kW 的功率区间是合理的。

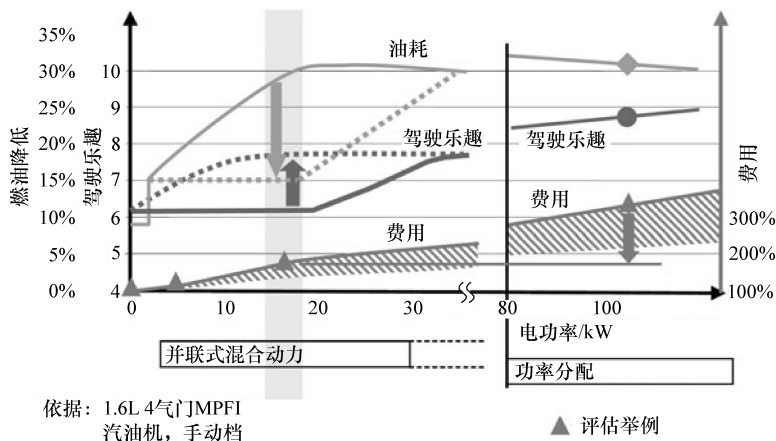


图 2.46 省油潜力、驾驶乐趣和加装电气功率的费用

如图 2.47 所示，把一辆车平均需要的驱动功率用相对应的速度来表示是可以理解的。除了急加速过程和爬坡以外，驱动功率低于 10kW 即足够用于汽车行驶。

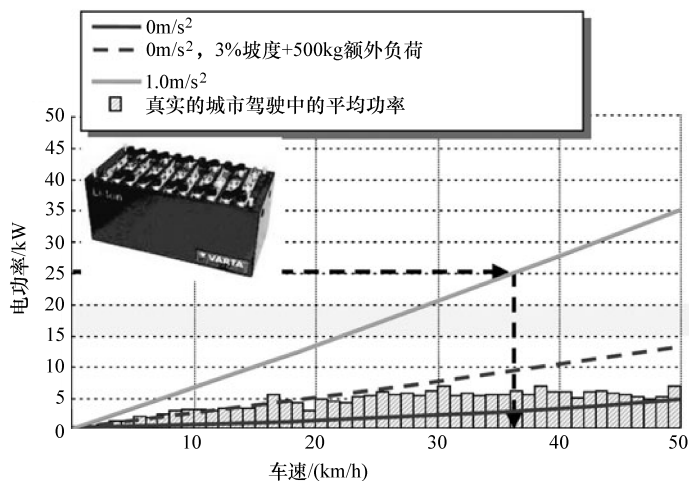


图 2.47 车速和驱动功率对照表

如图 2.48 所示，对于已经投入市场或将要投入市场，已经有样车的各种混合动力汽车的评测显示出电机和发动机驱动涉及的功率范围。微混合、中度混合和全混合动力汽车是基于功率的分配也很明确。图 2.48 中可以看出目前全混合动力汽车的投入比微混合和中度混合动力高。然而，不久以后会推出的微混合动力汽车，各大汽车制造商纷纷表示在新一代车辆上装配怠速熄火系统。

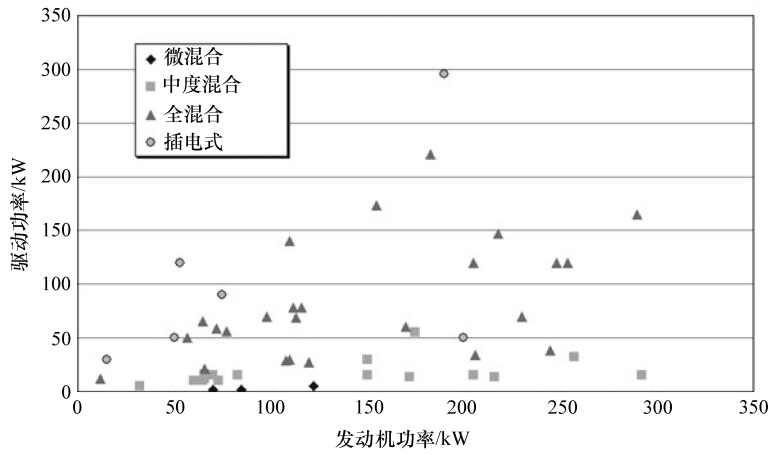


图 2.48 目前全混合动力汽车上电机和发动机的驱动功率

发展混合动力系统的出发点

第3章

每一种汽车新技术的应用都涉及增加汽车的生产成本和复杂性，因此汽车的性能必须要有相应的提高。发展混合动力汽车的动机在于：

- 1) 降低能耗或提高效率。
- 2) 减排。
- 3) 增加功能。

这三个目的或者说是满足法律上的框架条款。各种不同的标准和要求叠加在这些技术和立法方面，很大程度上影响最终的发展。下面列出了最重要的参考因素：成本/竞争力，品牌形象（创新、品牌广告……），制造商的策略（贴牌生产或供应商），市场分析、预测，公司政策角度，目标市场（考虑到不同目标市场的差异）……

决定量产开发混合动力汽车将带来巨大的风险，因为这需要大量的资本和开发能力，而这一决定是否正确可能需要经过很多年的时间才能验证。

3.1 政策法规

政策法规对技术的推动或阻碍远远大于技术方面，特别是有关混合动力汽车在世界各地的立法情况各有不同。图 3.1 显示的是三元催化转化器投入使用后，欧洲和美国的废气排放法规。

应该根据汽车工业的全球化尽可能扩大相关法规的有效范围。正因如此，长期以来有一个趋势，即制定一些全球通用的规则。欧洲经济委员会（ECE）为欧洲以及其他地跨欧亚的国家提供最重要的规范。欧洲经济委员会于 1947 年由联合国经济与社会理事会创立，是联合国旗下五个地区性经济委员会之一，旨在促进成员国之间的经济合作。委员会的主要任务是负责制定法规，简化各成员国之间的合作。该委员会制定的排放法规，又称为欧洲经济委员会规章，其指令条款已写入成员国法律法规，参见图 3.1。

1960 年欧洲经济委员会就对城市道路循环进行了定义。于 1970 年宣布的欧洲经济委员会第 15 号法规 ECE R 15/00 第一次规定了轿车的废气排放极限值，当时分为 9 个重量等级。这些废气排放极限值于 1971 年作为欧洲经济委员会的 70/220/EEC 指令生效。第一批废气排放极限值中只对一氧化碳和碳氢化合物进行了规定，对氮氧化物的限定出现在 ECE R 15/02 中。

欧洲经济委员会于 1981 年在 ECE R 15/04 的框架下对第 15 号法规做了最后一次修改。1983 年该法规被纳入 83/351/EEC。从这个版本起，恒定体积取样法（CVS）是作为测量过

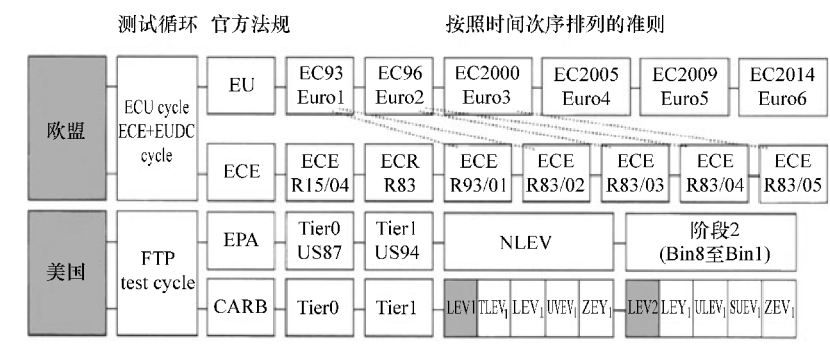


图 3.1 自从有了三元催化转化器后的废气排放标准

程的第一步，碳氢化合物和氮氧化物纳入总计重量，重量等级分类减少到 7 个。

柴油车相关的法规经历了从 1971 年的 ECE R 24/00 到从 1986 年开始生效的 ECE R 24/03 首次规定了关于可见炭烟的排放标准。

从 1989 年欧洲经济委员会第 83 号系列法规生效，从 ECE R 83/00 到 2001 年最后修订的 ECE R 83/05。根据这一系列法规将汽油机和柴油机划分为一个标准。行驶循环测试扩展至长途行驶（EUDC），引入微粒测量。第一个版本，根据排量分为 3 个等级，后来只是根据车辆重量划分类别：

(1) 客运

- 1) M1：8 座以下（不包括驾驶座）总重量 2500kg 以内或 6~8 座总重量 2500kg 以上。
- 2) M2：8 座以上（不包括驾驶座）总重量 5000kg 以内。

(2) 轻型货运

- 1) N1：总重量在 3500kg 以内，额外分为 3 个重量级。
- 2) N2：总重量在 12 000kg 以内。

逐步实现限制冷起动排放和曲轴箱废气排放，制定疲劳强度规定，定义车载诊断系统和排气处理系统的再生方法，寻找替代燃料等。

欧盟汽车政策的发展都与欧洲经济委员会第 83 号系列法规一致，如图 3.1 所示。ECER83/00与 88/76/EWG 一致。

欧 1 即 EC 93 包括根据指令 91/44/EEC93 对普通轿车制定的规定 ECE R 83/01 以及根据指令 93/59/EEC 对重型汽车和轻型货车的规定 ECE R83/028。

欧 2 即 EC 96 包括根据指令 94/12/EEC 的规定 ECE R83/03 及根据指令 96/69/EU 所规定的 ECE R83/04。

欧 3 或 EC 00 符合根据指令 98/69/EEC 所规定的 ECE R83/05。

欧 4 或 EC 05 符合根据指令 03/76/EEC 所规定的 ECE R83/05。

美国环境署制定的 EPA 法规跟欧洲 ECE 法规是平行的，Tier 0 从 1987 年开始生效，Tier 4 从 2004 年起生效。EPA 法规对汽车的排量进行分级，用“BIN”表示，参见 3.1.1 美国排放法规。

美国加州空气资源委员会（CARB）根据美国环境署的要求制定了减排规程，请参见 3.1.1 美国排放法规。

除了制定废气法规，节能法规对于混合动力汽车的推广也很重要。

3.1.1 美国排放法规

因为全球对新型驱动技术的研究以加州法规为依据，所以了解该法规的历史并理解其内容相当重要，出发点是基于节能法规及减排法规。

在加利福尼亚州，在 60 年前就出现了与交通息息相关的雾霾天气。为了员工的身体健康，1955 年洛杉矶所有摩托车快递员都配备防毒面具。不久以后，地方政府出台了第一个空气污染计划。之后减排法规越来越严，但是在南海岸空气盆地，汽车的排碳量仍占当地影响臭氧排量的 50% 左右，所以 1995 年南海岸空气盆地污染值有 153 天超过美国国家排放限制。近年来臭氧空洞有减小的趋势，但并没有解决根本问题。

上述问题说明了为什么加州在可持续性减排上发挥先驱作用。立法机构乃至全世界的汽车制造商都以加州为模板，以了解所采取的措施是否可能成为汽车减排的出路。

面对空气污染，美国在 1963 年出台了《净化空气法》。经过不断修正，该法案越来越严。其中规定除了改进常规汽车以外，还要加速电动车、新型驱动系统和低排碳燃料（如液化石油气、压缩天然气）的发展。

此外，所谓的《能源政策法》（EPACT）强制联邦一级车队经营者（政府、公共机构、私人车队）旧车更新的比例越来越大。

加州推广低排放驱动系统的计划符合美国政府的要求。1990 年出台的“加州低排放汽车计划”不仅在加州有效，而且被美国的其他联邦州借鉴。加州空气资源委员会引入了这一计划，根据以下排放标准对其实施进行监控、认证和分类：过渡性的低排放车辆（TLEV1）、低排放车辆（LEV1）、超低排放车辆（ULEV1）、零排放车辆（ZEV1）。

从 TLEV1 标准到 ULEV1 标准，排放标准越来越严格，而 ZEV1 标准则是针对纯电动车。根据这一计划，年销售量大于 35 000 辆的大中型汽车制造商必须做到 LEV1、ULEV1、ZEV1 排放标准的车辆比例逐步增加，如图 3.2 所示。按照规定，1998 年出售的零排放车辆比例在 2%，2003 年零排放车辆销售比例上升到 10%。年销售量小于 35 000 辆的小型汽车制造商，ZEV 系列标准从 2003 年开始实施。

由于电池的发展无法遵循这些严格的规定，所以这些条款经过多次讨论一再让步，新的数据标准和实施时间也一再推迟。1998 年加州低排放车辆计划升级到 LEV - II 标准，取缔了过度低排放分类 TLEV1 标准，同时增加了新分类 SULEV2（超极低排放车辆），如图 3.1 所示。这一分类涉及蒸发物排放（密闭室测定蒸发排放物法——SHED 测试）LEV II 标准也经过了几次修订和增订。目前有效的配额制度也称为 ZEV 授权。年销售量在加州超过 60 000 辆轻型和中型车辆的汽车制造商，其所销售的零排放车辆必须达到一定的 ZEV 配额。为了更容易地到达所需的配额，有这样的决定：平均排放极少的车辆，如混合动力汽车，达到一定的排量比例就能得到 ZEV 认可。混合动力汽车根据其电气化程度分为铜标、银标、增强银标和金标四个标准，并结合不同的鉴定要素，以 ZEV 信用积分形式累加。

根据 LEV - II 标准的车辆分类如下：低排放车辆（LEV2）、超低排放车辆（ULEV2）、超极低排放车辆（SULEV2）、零排放车辆（ZEV2）与子分类。

PZEV（部分零排放车辆）：遵循 SULEV 排放值，行驶超过 150 000 mile（1 mile = 1.6093 km）没有蒸发排放和满足车载诊断系统要求的车辆：铜标。

AT - PZEV（先进技术部分零排放车辆）：以前称为等效零排放车辆（EZEV）：遵循

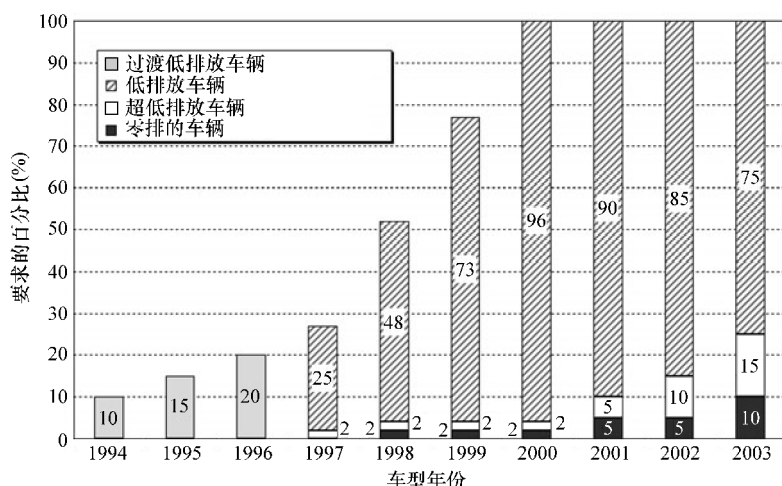


图 3.2 从 1999 年开始不同车型的排放要求（百分比）

PZEV 排放值并含有 ZEV 组件，如电力驱动的混合动力汽车（排量更低的天然气汽车也划分在这一类）：银标。

增强型 AT-PZEV：这些车辆定义为 PZEV 类，有至少 1 个零排放车辆积分，可以使用单一燃料（插电式混合动力汽车、氢气动力汽车）：增强银标。

ZEV：即零排放车辆，电池动力车辆或氢燃料电池动力车辆。当这类车辆只能在环境温度低于 4℃ 工作且其排放最大值达到 ULEV（超低排放）标准时，允许安装加热装置。根据各自的特定属性分为 8 大类：

- 1) NEV 低速电动车，电池驱动，最高速度为 35km/h：增强银标。
- 2) 0 类：实用短距离电动车，续航里程低于 50mile：增强银标。
- 3) I 类：中距离城市电动车，续航里程 50 ~ 75mile：金标。
- 4) 1.5 类：城市电动车，续航里程 75 ~ 100mile：金标。
- 5) II 类：全功能电池电动车，续航里程 100 ~ 200mile：金标。
- 6) III 类：燃料电池车带快速充电（小于等于 10min），续航里程超过 100mile 或续航里程超过 200mile 的电池电动车：金标。
- 7) IV 类：这类车辆必须保证 15min 以内充入的电量满足至少 190mile 的 UDDS 环城行驶距离（城市道路循环）：金标。
- 8) V 类：这类车辆必须保证 15min 以内充入的能量满足至少 285mile 的 UDDS 环城行驶距离（城市道路循环）：金标。

表 3.1 显示根据车辆的生产年份和所属标准，年销售量在加州超过 60 000 辆轻型和中型车辆的汽车制造商需要达到的最低零排量配额。2008 年出厂的轿车和 1 类轻型车的销售量必须达到的最低配额 10%，2018 年出厂的车辆则要提高到 16%。从 2008 年起，出厂车 2 类轻型车也包括在内。如果某一低等级配额不达标，但较高等级的配额达标，算整体达标；如果仍不达标，处以罚款。

在计算 ZEV 配额时，根据 8 种零排放续航里程分类和出厂年份不同获得不等的积分

(加倍积分)，也就是说这些车辆将被重复计算，见表 3.2。

表 3.1 最低的 EEV 配额（对于制造商），对应于加州每年售出的大于 60 000 辆的轻型和中型车

年度	比例要求		最低要求			PZEV 铜标
	轿车和 1 类轻型车	2 类轻型车	I 类 ZEVs 金标	增强银标	AT - PZEV 银标	
2009	11%	5.61%	2.475%	—	2.475%	6.05%
2010	11%	7.48%	2.475%	—	2.475%	6.05%
2011	11%	9.35%	2.475%	—	2.475%	6.05%
2012—2014	12%	12%	0.79%	2.21%	3%	6%
2015—2017	14%	14%	3%	3%	2%	6%
2018 年以后	16%	16%	5%	2.5%	2.5%	6%

表 3.2 依据于零排放里程和出厂年份的零排放汽车信用积分分类

车型	零排放的里程/mile	零排放汽车信用积分		
		MJ 2005—2008	MJ 2009—2017	从 MJ 2018 起
NEV	—	0.15	0.3	0.3
0 类	<50 起	1.5	1	1
I 类	50 ~ 74 起	7	2	2
1.5 类	75 ~ 99 起	—	2.5	2.5
II 类	从 100 起	10	3	3
III 类	从 100 起	40	4	3
IV 类	从 200 起	—	5	3
V 类	从 300 起	—	7	3

从 2009 到 2011 年出厂的车辆中可以选出代替表 3.1 的最低配额。根据这一选择，年销售的汽车（轿车和 1 类轻型车）中必须有至少 0.82% 是氢燃料电池车或者电池电动车（III 类 ZEV），剩余的金标要求可以由 AT - PZEV（先进技术部分零排放）车辆代替，III 类 ZEV 可以根据以下方案由其他 ZEV 类型换算：

III 类 ZEV = 2 倍 I 类 ZEV = 1.6 倍 1.5 类 ZEV = 1.33 倍 II 类 ZEV = 0.8 倍 IV 类 ZEV = 0.57 倍 V 类 ZEV

从表 3.1 可以看出大型制造商被允许出售 6% 的新注册部分零排放车辆。应该指出的是部分零排放车辆只有 0.2 个积分（基本积分）。小型制造商（每年在加州销售小于 60 000 辆汽车）可用部分零排放车辆代替整个零排量车辆配额。

PZEV（先进技术部分零排放）车辆（银标），除原有的 0.2 个积分以外，还根据不同的技术如混合动力汽车、天然气汽车和氢燃料电池车而获得额外积分。额外积分最高可达 3.0。表 3.3 显示的是针对混合动力汽车采用不同先进技术的积分分配。

加满气气压达到 3600psi（1psi = 6.894kPa）的使用气体燃料的汽车（天然气汽车）获得 0.4 的额外积分。加满气气压达到 5000psi 的氢气动力汽车的额外积分为 0.5。

当车辆零排放行驶超过 10mile，会得到额外积分。这类积分可通过等效纯电动续航里程（城市道路循环中的等效全电动里程，EAER）以及有效的电池充电续航里程（实际电量耗尽里程，Rcda）求得。有效电池充电续航里程指，电池内由外网或能量回收获得的电能完全耗尽时，车辆在城市道路循环中可以达到的行驶距离。推导系数为 UF_{Read} （实用因素）。

表 3.3 先进技术的信用积分分类

	类型 C	类型 D	类型 E	类型 F	类型 G
专门的混合特性（基本要求：加速功能、能源回收、起/停功能）					
电驱动峰值功率	$\geq 10\text{kW}$	$\geq 10\text{kW}$	$\geq 50\text{kW}$	EAER $\geq 10\text{mile}$ (UDDS)	EAER ≥ 10 mile (US06)
传动链电压	$< 60\text{V}$	$\geq 60\text{V}$	$\geq 60\text{V}$	$\geq 60\text{V}$	$\geq 60\text{V}$
信用积分（不含初始积分）					
MJ 2003—2011	0.2	0.4	0.5	0.72	0.95
MJ 2012—2014	0.15	0.35	0.45	0.67	0.9
从 MJ 2015 起	0.1	0.25	0.35	0.57	0.8

EAER = 纯电续航里程（UDDS 或 US06 循环）

等效全电动里程大于等于 10mile，实际电量耗尽里程为 10 ~ 40mile：

$$\text{积分} = \frac{EAER(1 - UF_{\text{Read}})}{11.028} \quad (3-1)$$

等效全电动里程大于等于 10mile，实际电量耗尽里程大于等于 40mile：

$$\text{积分} = \frac{EAER}{29.63} \quad (3-2)$$

此外，使用清洁燃料也可获得积分。前提是燃料相关的非甲烷有机气体的排放量不得超过 0.01g/mile，该值所指包括燃料的生产、销售和行驶中的排放，积分最高为 0.3。这取决于车辆使用清洁燃料行驶功率。

总而言之，这一法案规范了实际操作，对混合动力汽车的普及有强制推动作用。

表 3.4 所示为美国的普通轿车排放法，从 2009 年开始生效。到目前为止最早制订的（美国联邦排放标准）Tier I 标准仍是所有有害物质极限值的指标。Tier II 标准是 10 辆轿车或 11 辆 6001 ~ 8500lb（1lb = 0.454kg）重的轻型货车排放标准（Bins）的平均极限值。Bin 9 到 Bin11 是过渡条款，到 2007 年底有效。从 2004 年 Tier II 标准生效起，已经有超过 25% 的新注册轿车和重量不超过 6000lb 的轻型货车根据 Tier II 终极标准进行了认证。剩下的 75% 仍可根据 Tier II 过渡标准进行车辆登记。按照分阶段引进计划，每年都必须有 25% 的车达到 Tier II 终极标准。2007 年开始全面实行针对轿车和重量不超过 6000lb 的轻型货车的 Tier II 指标。重量在 6001 ~ 8500lb 重的轻型货车和中型客车（6001 ~ 10000lb）的分阶段实行计划在 2009 年截止。加州在相应的时间段内同样从 LEV 升级到 LEV 2。

汽车制造商年出厂车辆平均排放的氮氧化物由美国联邦环境署法令规范。区别在于，根据加州空气资源局规定，计算车辆平均排放以非甲烷有机气体的排量为基础。

表 3.4 美国现行最高排放许可等级 Bin 8 及加州的各排放标准

车辆	CO	NMOG ^a	NO _x	PM ^b	HCHO
Tier II（Bin8） ^c	3.4	0.1	0.14	0.02	0.015
LEV II（加州）					
LEV2 50 000 mile	3.4	0.075	0.05	0.01	0.015
ULEV2	1.7	0.04	0.05	0.01	0.008
SULEV 120 000mile	1.0	0.01	0.02	0.01	0.004
ZEV	0	0	0	0	0

a. NMOG：非甲烷有机气体。

b. 仅柴油车需要 120000mile。

c. 根据 Tier II 车辆平均氮氧化物排放 2004 ~ 2006 年为 0.3g/mile，之后为 0.07g/mile。

2010 年起生效的表 3.5 针对的是行驶 120 000mile、总重量超过 8500lb 的车辆。从 2009 年起车辆平均排放必须低于 Bin 5 标准。

表 3.5 美国从 2010 年起排放法规要求（总和）

g/mile 对应 12 万 mile					
	NMOG	CO	NOx	PM	HCHO
Bins	第二阶梯 美国国家排放标准 Tier II				
8	0.125	4.2	0.2	0.02	0.018
7	0.09	4.2	0.15	0.02	0.018
6	0.09	4.2	0.1	0.01	0.018
5	0.09	4.2	0.07	0.01	0.018
4	0.07	2.1	0.04	0.01	0.011
3	0.055	2.1	0.03	0.01	0.011
2	0.01	2.1	0.02	0.01	0.004
1	0	0	0	0	0
车队平均			0.07		
加利福尼亚第二阶段排放标准 LEV II					
LEV2	0.09	4.2	0.07	0.01	0.018
ULEV2	0.005	2.1	0.07	0.01	0.011
SULEV	0.01	1	0.02	0.01	0.004
ZEV	0	0	0	0	0
车队平均值减少量 2007/2010 年	0.043/0.035				

汽车制造商可以根据 Bin 1 ~ 8 标准在全美进行车辆认证，在加州则是根据当地的标准（LEV、ULEV、SULEV 以及 ZEV）进行认证。已售出的经过认证的车辆还要受到其他的条款的约束，车辆氮氧化物平均排放量按照 Bin5 应低于 0.07g/mile，在加州必须符合车辆平均非甲烷有机气体排放值标准。

除了上述程序，在加州还需要遵守的冷起动一氧化碳排放限值标准（10g/mile 在 -7°F SULEV）以及限制在蒸发物排放（SHED 测试）。

除了限制有害物质排量，由于 1973 ~ 1974 年发生的石油危机，美国从 1975 年开始执行车辆平均油耗控制，也就是所谓的 CAFE 《整体平均燃油能效标准》。这一标准针对的是一家汽车制造商年全部出厂车辆的平均油耗。当时制定油耗标准的目的是到 1985 年汽车的能效翻倍。此后这一标准基本保持不变，在美国油耗的单位是英里/加仑（mpg）：

$$\frac{235.215}{\text{mpg}_{US}} = \frac{1}{100\text{km}} \tag{3-3}$$

油耗如果高于标准值，每 0.1mile 罚款 5.5 美元。这一金额将与出售的数量相乘。

CAFE 作为美国限制平均油耗的现行目标协议，其标准为

轿车： 27.5 mpg = 8.6L/100km

SUV、皮卡等： 23.5 mpg = 10.01L/100km

油耗和废气排放量一样按照 FTP75 行驶循环进行计算。目前只有欧洲的汽车制造商会被罚款，因为美国从欧洲进口的车辆几乎都是大型和豪华型车辆，这些进口车辆的平均油耗超标。美国本土的汽车制造商则通过销售小型和节能型车辆拉低大型车和顶级车的油耗，使平均值保持在规定范围内。

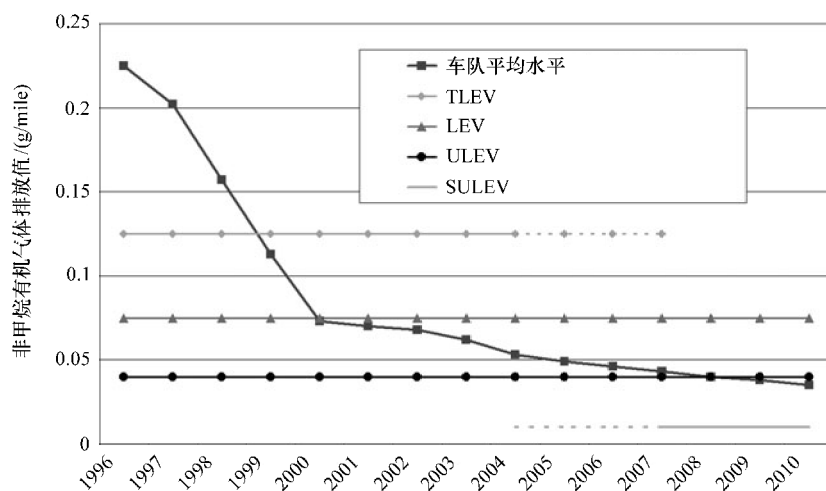


图 3.3 加利福尼亚车辆非甲烷有机气体排放标准

3.1.2 欧洲排放法规

在节能减排两个方面，欧洲的立法机构对混合动力汽车和常规汽车一视同仁，只是测试程序有所不同。插电式混合动力汽车与非外网充电式混合动力汽车由于存在一个运行工况转换器而有所不同。以电池的限制性预处理条件或固定充电状态以及适用于轿车和轻型货车的新欧洲行驶循环为准进行循环测试。

过去欧洲立法的重点在避免有害物质排放。图 3.4 表示的是奥地利某种轿车的一氧化碳、碳氢化合物、氮氧化物及微粒等排放标准的发展。图 3.5 显示出货车所对应的减排法规越来越严。

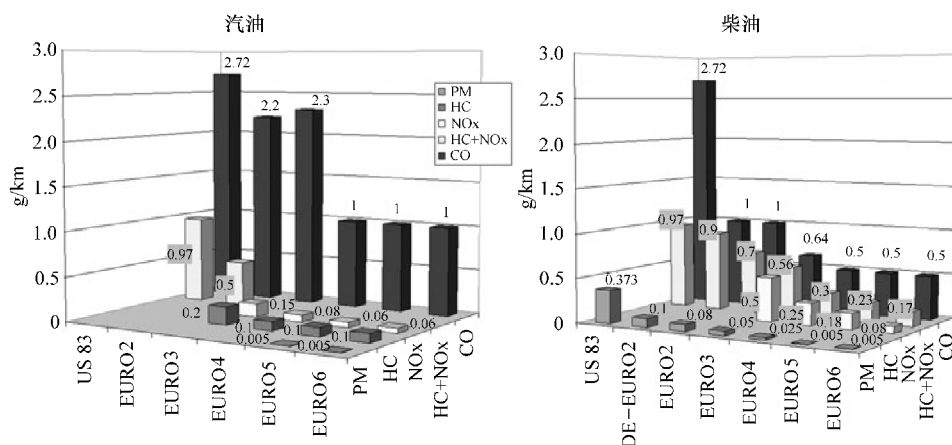


图 3.4 欧盟内部废气类型—检测极值的发展

适用于重型货车的现行排放限值最初是由指令 88/77/EWG 规定的。在这个指令的基础

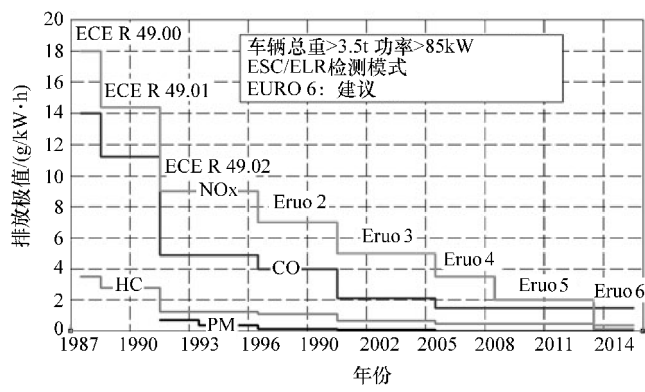


图 3.5 在欧盟内废气类型—检测极值的研究（奥地利某种重型柴油货车）

上通过了以下分级的法令：

- Euro 1 指令 91/542/EWG
- Euro 2 指令 96/1/EG
- Euro 3 指令 99/96/EG [39] 及指令 2001/27/EG
- Euro 4 指令 99/96/EG [39] 或指令 2005/55/EG
- Euro 5 指令 99/96/EG [39] 或指令 2005/55/EG
- Euro 6 规定 595/2009

规定 595/2009 适用于 2610kg 以上的 M1、M2、N1 和 N2 类的车辆，以及所有 M3 和 N3 类车辆。M2 类指 8 座以上（不含驾驶座），总许可重量 5t 以下客运车辆。M3 指 8 座以上（不含驾驶座），总重量许可 5t 以上客运车辆。N3 指总重量许可 12t 的货运车辆。

目前对于重型货车的排碳量没有限定。

表 3.6 列出了标准化测试方法下达到的极限值。与轿车和轻型货车不同，对重型货车进行的发动机进行无底盘测量，在试验台只对发动机进行测试。

表 3.6 欧盟对于重型柴油货车的排放标准

重型柴油货车										
排放 法则	出台 时间	备注	检测方式	CO/ (g/kW·h)	HC/ (g/kW·h)	NMHC/ (g/kW·h)	NO _x / (g/kW·h)	PM/ (g/kW·h)	烟气 /m ⁻¹	NH ₃ / ×10 ⁻⁶
Euro 1	1992. 1	<85kW	ECE R -49	4. 5	1. 1	—	8	0. 612	—	—
		<85kW	ECE R -49	4. 5	1. 1	—	8	0. 36	—	—
Euro 2	1996. 10		ECE R -49	4	1. 1	—	7	0. 25	—	—
	1998. 10		ECE R -49	4	1. 1	—	7	0. 15	—	—
Euro 3	2000. 10		ESC&ELR	2. 1	0. 66	—	5	0. 1 ^a	—	—
			ECT	5. 45	—	0. 78	5	0. 16 ^b	—	—
Euro 4	2005. 10		ESC&ELR	1. 5	0. 46	—	3. 5	0. 02	0. 5	—
			ETC	4	—	0. 55	3. 5	0. 03	—	—

(续)

重型柴油货车										
排放 法则	导入 年份	备注	检测方式	CO/ (g/kW·h)	HC/ (g/kW·h)	NMHC/ (g/kW·h)	NO _x / (g/kW·h)	PM/ (g/kW·h)	烟气 /m ⁻¹	NH ₃ / ×10 ⁻⁶
Euro 5	2008. 10		ESC&ELR	1. 5	0. 46	—	2	0. 02	0. 5	—
			ECT	4	—	0. 55	2	0. 03	—	—
EEV	1999. 10		ESC&ELR	1. 5	0. 25	—	2	0. 02	0. 15	—
			ETC	3	—	0. 4	2	0. 02	—	—
								PM ^c #/kW·h		
Euro 6	2013. 1		ESC	1. 5	0. 13	—	0. 4	0. 01		10
			ETC	4	0. 16	—	0. 4	0. 01	10	
			WHSC							
			WHTC							

a: 发动机每个气缸容积小于 0. 75L 额定转速超过 3000r/min, 1. 3g/kW·h。

b: 发动机每个气缸容积大于 0. 75L 额定转速超过 3000r/min, 2. 1g/kW·h。

c: 这一个值最迟在 2010 年 4 月 1 日确定。

现行的欧洲瞬态标准测试循环 (ETC) 和欧洲稳态标准测试循环 (ESC) 将于欧 6 指令开始时由全球统一稳态标准测试循环 (WHSC) 和全球瞬态标准测试循环 (WHTC) 取代。相应的极限值最迟于 2010 年 4 月 1 日推出。

此外将为货车制定专门的 EEV 标准。增强环保型汽车 (EEV) 是目前适用于公交车和大型货车的欧洲要求尾气排放标准, 见表 3. 6。这类环保型大型货车和公交车新车型排放质量在 2008 年 10 月后开始全面实施欧 5 标准。出于竞争原因, EEV 标准被公交车队招标所采纳。

在本书“1. 1 汽车发展及其对环境的影响”中就已经提到, 相对于美国将减少有害物质排放摆在首位的政策, 欧盟立法机构在继续减少有害物质排放、在一定程度上降低油耗之后, 目前把减少排碳列为首要任务 (ACEA 目标)。

2008 年 12 月 17 日, 欧盟委员会已经立法限制轿车排碳:

2012 年起, 在所有欧盟成员国新登记的轿车平均排碳目标值 120g CO₂/km。该数值被新欧洲汽车行驶循环采纳。从驱动技术上必须实现 130g CO₂/km, 其他 5g CO₂/km 来自增加生物燃料配额, 剩余的 5g CO₂/km 来自于低滚动阻力轮胎、换挡点指示器、轮胎压力监测及高效节能空调。

车辆允许排碳的最大值以 130g CO₂/km 为基础, 并根据车辆的重量用式 (3-4) 进行计算, 而不是让轻型车辆获得不公平的优势, 见图 3. 6。

$$\text{最高排碳许可值} = 130 + a(M - M_0) \quad (3-4)$$

式中 M ——车辆总重量 (kg);

M_0 ——基础重量, $M_0 = 1372. 0\text{kg}$;

a ——系数, $a = 0. 0457$ 。

图 3.6 显示，特别是重型车辆，达到该目标值是一个重大的挑战。目前，较大的混合动力汽车还没有达到这一目标。

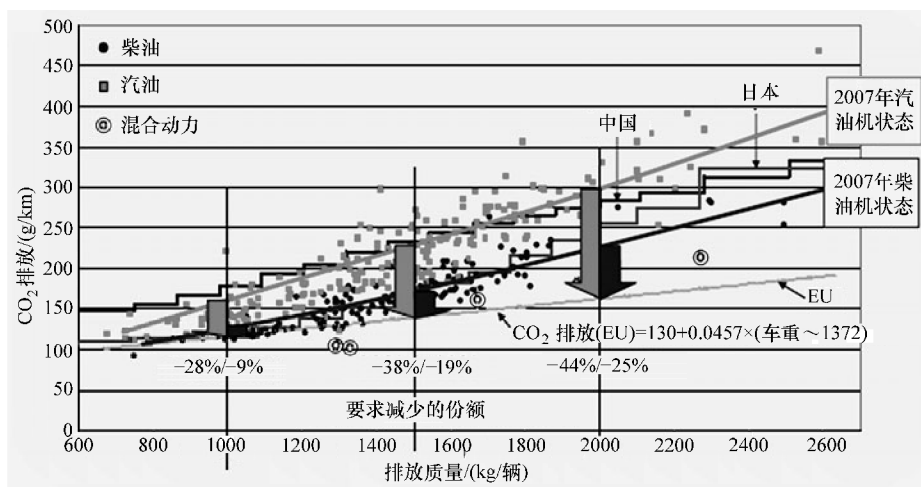


图 3.6 2007 年欧盟的 CO₂ 目标值和现状（以车辆基本重量为基础）

该计划将分阶段实施，其有效百分比逐年递增：

2012 年为 65%；2013 年为 75%；2014 年为 80%；2015 年为 100%。

制造商采取如太阳能屋顶、热量回收等生态创新技术抵消的排碳量最多为 7g CO₂/km，还包括排碳量低于 50g CO₂/km 的车辆成倍增长（2012 年和 2013 年为 3.5 倍，2014 年为 2.5 倍，2015 年为 1.5 倍）。

平均排碳量超过标准的车辆，每注册一辆由制造商缴纳罚款：

超标 1g: 5 欧元/辆；

超标 2g: 20 欧元/辆；

超标 3g: 45 欧元/辆；

超标 4g: 140 欧元/辆；

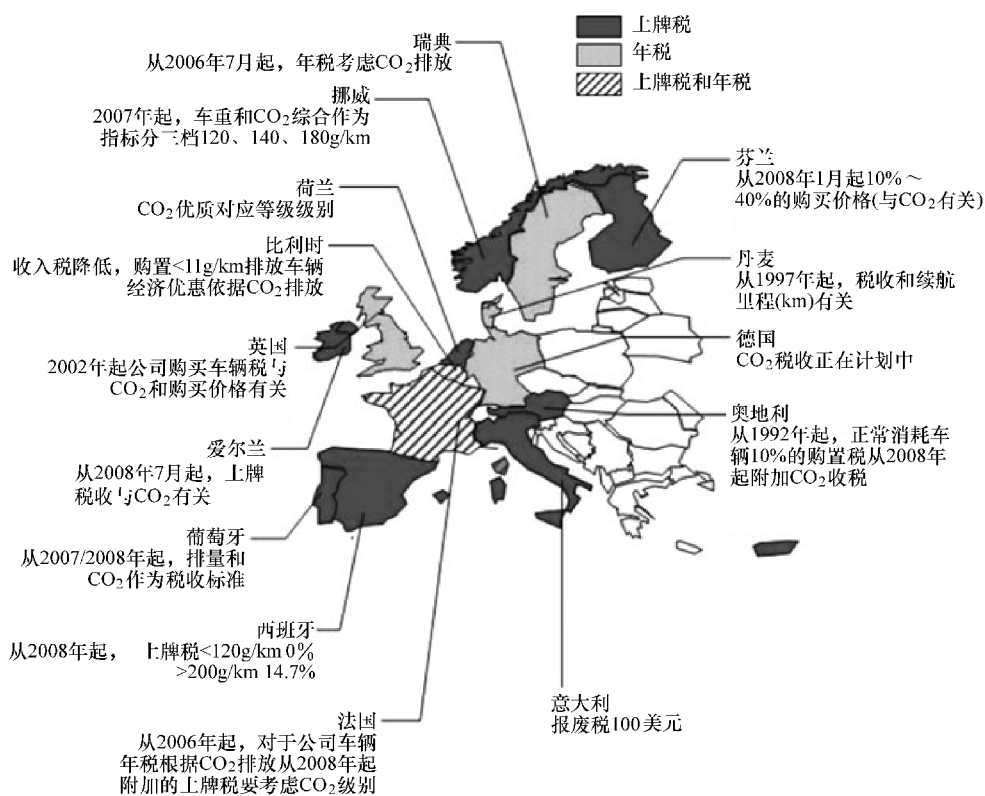
之后每多增加 1g，多收 95 欧元/辆。

欧盟到 2020 年在用成本效益方式实现一个长期目标值：95g CO₂/km，并对其实施，包括超标罚款等方面进行定义。

除了欧盟规定的车辆平均排碳极限值以外，各成员国也出台了不同以排碳量为依据税收体系对车辆认证和行驶进行调控，见图 3.7。

进城限制

越来越多的欧洲城市开始限制车辆进城。根据目的性、政策法规和解决方案的不同，各个城市限行条款也不同。最有名的例子是伦敦市区，从 2003 年开始收取“交通拥堵费（尘土费）”。从 2009 年起，在工作日进入伦敦市区的车辆每天每车收取 8 英镑。这一收费系统根据监控摄像头拍摄的进城和出城记录计算费用。有些车辆也可免交这些费用，比如具有采用新型驱动技术的车辆（电动车和高于特定电气化程度的混合动力汽车）。

图 3.7 欧盟以 CO₂ 排放为依据的车辆税收系统

3.1.3 小结

美国加州是世界上第一个推广电动车 (ZEV) 的地区，同时也把混合动力汽车写入法律条款，并制定了适用于各大生产商的电池电动车或燃料电池车 (ZEV)、混合动力汽车 (AT-PZEV) 和超低排放车辆 (PZEV) 的配额。如果未能达到上述配额将被处以罚款。

欧洲和日本没有出台关于混合动力汽车的法案，而是以降低排碳量作为目标。除了欧盟规定的排碳平均值以外，各成员国还分别建立了针对排碳分类和有毒物质排放的税收和收费系统。

美国也有节能法规，也就是所谓的《整体平均燃油能效标准》(CAFE)。该条例限制了按销售加权以及制造商每年出厂车辆平均油耗，以英里/加仑 (mpg) 作为计量单位。

美国以及欧洲，适用于推广混合动力汽车的法律法规并没有跟上。对于混合驱动要设立新法规，确立在汽车行驶循环测试中的操作标准。

基本上可以说，未来的节能减排条款表明，汽油机以节能为主，柴油机以减排为主。而混合动力技术为这两种驱动方式提供了一个有效的节能减排办法，如图 3.8 所示。

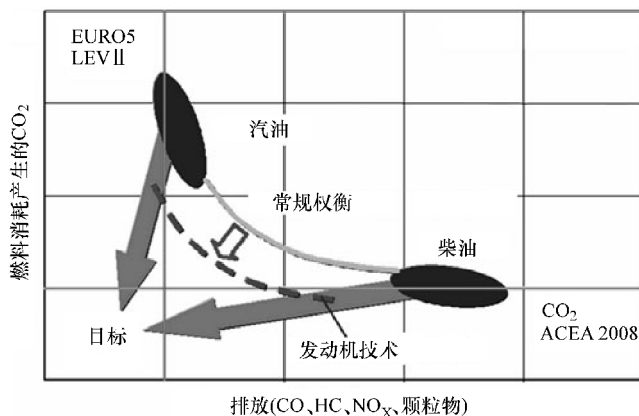


图 3.8 汽油机和柴油机的优化目标

3.2 油耗

从技术角度而言，在汽车行业发展混合动力技术的主要目的是为了降低油耗。混合动力技术的潜力可以从两个方面来挖掘：一方面是在两种驱动技术结合上开发新的可能性、拓展自由度，包括能量储存能力；另一方面是如果用能量回收技术对混合动力技术进行支持，在车辆减速时转换和储存制动能。根据发动机和电机的不同结合方式，产生不同的节能技术。

3.2.1 负荷点提升

发动机具有这样的性质，在部分负荷区运行会导致较高的比油耗，比高负荷区运行的时候效率低。在部分负荷时，摩擦或牵引功率成比例增加。这种趋势出现在所有的发动机上，这种部分负荷时低效率的情况在均质燃烧的汽油机上表现特别明显，其原因是通过气门的换气造成能量损失。图 3.9 显示的是一台多点式燃料喷射发动机的油耗（场图），包括在第 4 档和第 6 档时的行驶阻力曲线，以及时速为 50km/h、100km/h 和 130km/h 平地匀速行驶时恒定功率双曲线（曲线表示功率）。低转速和高负荷时，发动机达到最低比油耗，随着转速增加，负荷降低，比油耗升高。图 3.9 中显示，该车辆以 130km/h 匀速行驶时，发动机转速达到 1500 ~ 2000r/min 时比油耗低于 250g/kW·h，发动机达到最高转速时，比能率翻倍。

因为车辆平均都在较低的部分负荷状态下行驶，这个情况很重要。图 3.10 显示的是新欧洲行驶循环测试中负荷点出现的频率，圆圈表示持续时间的分布。

在综合特性曲线范围内，发动机的工作点移动，一般功率越高负荷越大，这就是负荷点提升。负荷点提升可以通过两种方式实现。

在大部分混合动力技术中，可以在足够的电功率保证下使驾驶人所希望的传动动力总成的负荷/转速要求跟发动机负荷/转速要求最大限度地分开，从而使发动机在能源需求量小时，也能在节能特性曲线范围内工作。这是策略 1，通过电机提升负荷点，如图 3.9 所示。未用于驱动的剩余的机械能通过电机转换为电能，暂时储存在电池中。这部分能量用于电动驱动、加速等。然而，必须指出的是在通过提升负荷点改善的发动机效率必须比机电转化及

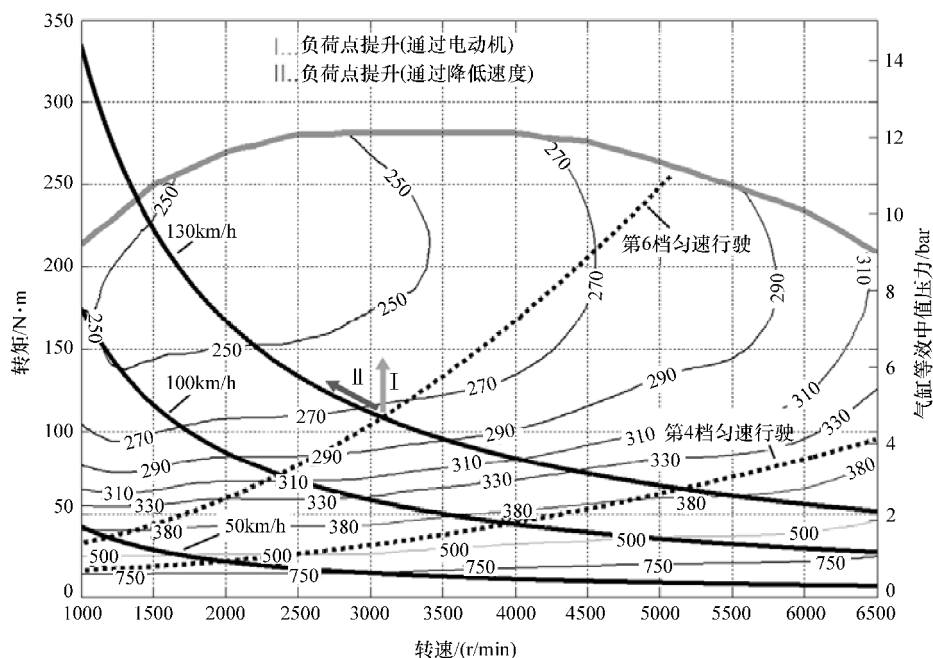


图 3.9 MPFI 自吸式发动机的燃料消耗场图 (消耗值单位为 $\text{g/kW} \cdot \text{h}$)

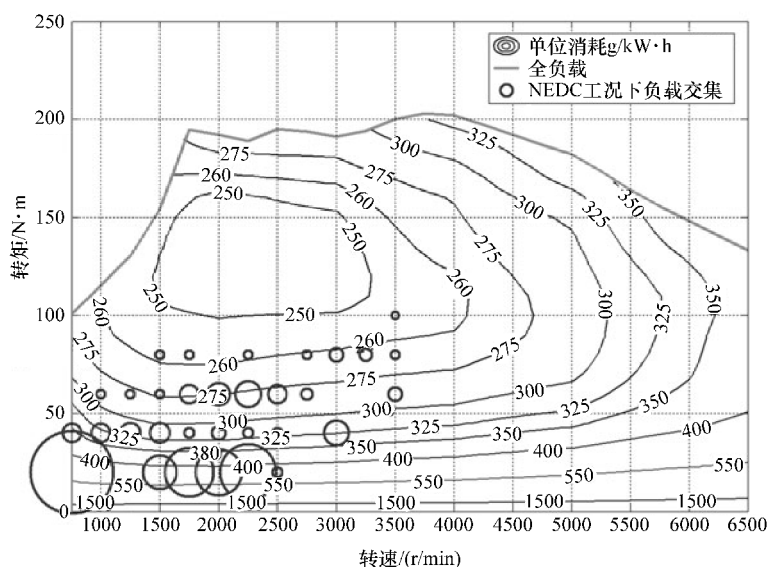


图 3.10 新的欧盟行驶循环下驱动点的出现频率

电池充放电损失的功率高。由于这个原因，这种技术依赖于发动机的燃烧过程，大部分只在一个非常低的负荷范围内，而且只能在汽油机内可以有效转化。已经处于负荷范围中段，由于效率链太长，无法实现节能。柴油机的部分负荷因已经达到一定高效率，很难通过提升负荷点进行优化。

另一个提升负荷点的方式是实现极低变速比的变速器/差速器设计。从图 3.9 中可以看

出,在相同的功率要求下,通过增加变速时间,发动机的转速下降,转矩变大,由此发动机工作点在特性曲线图上移动到低比能耗的位置(所谓的减速策略,即策略2)。然而这样一来用于加速的转矩或牵引力降低,也就是说灵活性降低。牵引力与发动机的转矩储备成一定比例,也与差速器转矩从任一个负荷点到满负荷线的曲线,以及传动链的变速比成比例。自动“降速时”牵引力和转矩降低,从而导致灵活性相应降低。电机在这里的作用就是补偿或过度补偿,也就是说通过电机的运转使车辆在相同或更优良的驾驶性能下,负荷点提升达到非常高的效率。其优势在于,在绝大多数情况下驱动无需电力支持(急加速时例外),因此机械变速器的能量转换效率较高。

这种方法特别适合带涡轮增压的发动机瘦身技术,因为通过上述方法可以减小延迟增压压力(增压盲区),参阅“4.1.1 汽油机”。

在丰田混合动力系统中,一台电动机和一台发电机通过行星轮变速装置与发动机啮合,充分利用提升负荷点的效果,参阅“第6章 轿车和摩托车混合动力方案详解”。两台电机与行星轮变速装置啮合,构成一个电动无级变速器(E-CVT),它允许发动机沿功率双曲线上自由选择工作点。

在串联式混合动力技术中,发动机和轮毂电机之间没有机械关联,因此在选择发动机工作点时的自由度更大,参见“2.1 串联式混合动力”。电池容量足够大的情况下,可以选择最佳工作点即发动机油耗最低的工作点,电池供电弥补轮毂电机和发动机之间的功率差。还有一种驱动方式是,发动机提供所需的驱动功率,但跟电动无级变速器在功率双曲线中的能耗优化范围一样。

混合动力技术可以使柴油机在微粒过滤器的帮助下间接地降低能耗。新型微粒过滤系统可以有效地过滤尾气中颗粒较大的微粒。当过滤器里的微粒收集到一定程度时,必须进行再生处理,也就是自由燃烧,使排气背压保持在容许范围内。自由燃烧可通过氧气(热再生)或二氧化氮进行。然而热再生取决于过滤器上的涂层,要求的温度为 $600 \sim 650^{\circ}\text{C}$,而大多数情况下,这一温度只出现在车辆在高速公路上高速行驶的时候。因此需要经常采取如打开空调和后窗除霜器等不必要的措施来提高发动机负荷,增加排气温度。一般情况下,首先会在发动机方面进行控制,如在气体膨胀时喷入燃料,导致气缸内壁润滑层弱化。这一系列措施对于驾驶人而言没有其他的用途,只能增加油耗。混合动力汽车可以明显改进这些状况:负荷点提升为电池充电,而采用智能的操作技术还能更省油。

3.2.2 起/停系统

在城市交通环境或堵车时,车辆经常处于静止状态,无需能量进行驱动。为了达到节能减排的目的,在车辆静止或在一定速度内行驶时,发动机停止工作。前提是,踩下制动踏板或松开离合踏板,发动机达到一定温度,同时没有其他驱动需求(如空调压缩机、助力转向泵、真空泵等),或蓄能器里所蓄能量足以用于驱动。当再次踩下离合踏板或松开制动踏板时,发动机再次起动。电子电池传感器可以监控电池充电状况,当电池电量不足时禁用怠速熄火系统,或者是电池未达到起动所需电量的最低极限值时,该传感器可以在发动机完全停止前的怠速过程中安排起动发动机。

由于减排的需要,在冷起动时,只有当排气后处理系统达到工作温度且短时间内不会降温的情况下,才可以使发动机停止工作。因此,在新欧洲行驶循环测试中,在行驶循环开始时,

冷起动时发动机开始工作，在车辆第三次处于静止状态时发动机停止工作，如图 3.11 所示。

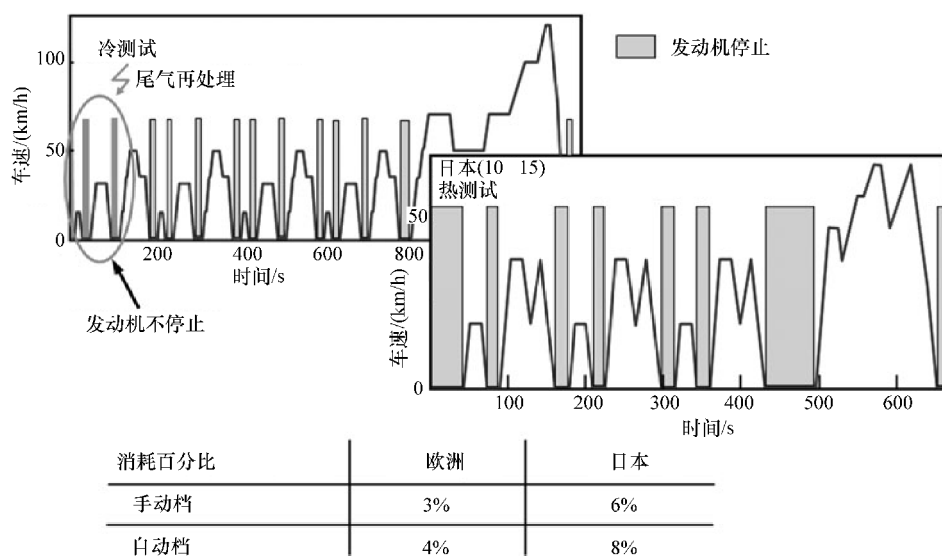


图 3.11 新欧洲行驶循环和日本验证测试中起/停系统在车辆起步前节能的潜力值

节能与发动机空转油耗相关，以一辆中档车为例，在新欧洲行驶循环测试中油耗降低明显，最高可省油达到 0.5L/100km。由于自动挡车辆的液力变矩器会使发动机在空转中造成油耗损失，因此起/停系统能使这类车可以达到更好的节能效果。日本验证测试中减排潜力最高，因为这个测试是在发动机正常工作温度下进行，而且汽车静止的时间比新欧洲行驶循环规定的时间长。

起/停系统虽然不是仅限在混合动力汽车使用，但混合动力汽车由于配备了电器组件为该技术提供了便利的前提条件。起动有三种方法：通过凸轮轴上的电机，一般是排列形式为凸轮轴-起动装置-发电机 KSG，或通过传动带驱动的起动机/发电机组以及小齿轮起动装置。

缩短起动时间且循环次数更多、功率提升的电动机、改良的轴承支撑架、行星轮变速装置以及强化的单轨机构跟小齿轮装置一起构成怠速熄火系统。快速起动需要满足发动机侧的所有前提条件，也就是说凸轮轴位置要存储在运行的发动机中，输油管内的油压要保持在发动机停止时的状态。自动挡车辆的电子油泵为变速器和变矩器提供稳定的油压，使车辆可以立即起动。除电子驱动油泵以外，还可以使用液压脉冲存储器，通过断开驱动电源节省更多燃料。

除了改进车载电网和电器组件以外，还需要一个相配套的安全系统，其功能是在发动机罩关闭等一系列操作结束后且驾驶人在驾驶位就座，并系上安全带后，发动机才能自动起动。

就有害物质排放问题，发动机的应用也必须跟怠速熄火操作相适应。由于三元催化转化器冷却较为缓慢，而起/停系统必须在发动机达到一定温度时（即三元催化转化器达到一定温度时）才开始工作，汽车在热起动时有害物质排放减少。而配备三元催化转化器的汽油机的问题在于：在车辆静止时燃料喷入，而发动机完全停止工作前三元催化转化器会泵入空气，因此三元催化转化器内氧气泵入，而无碳氢化合物留存。这会导致再起动时氮氧化物排

量增加。补救措施是采取特殊的强混合起动技术。舒适性要求是特殊起动技术面临的一个巨大挑战。设计上必须使驾乘人员感受不到明显的起步和停车过程。而柴油车由于柴油机压缩比相对高,这种舒适性较为难以实现。图 3.12 以丰田雷克萨斯为例,展示汽油机非常柔和的起步过程。

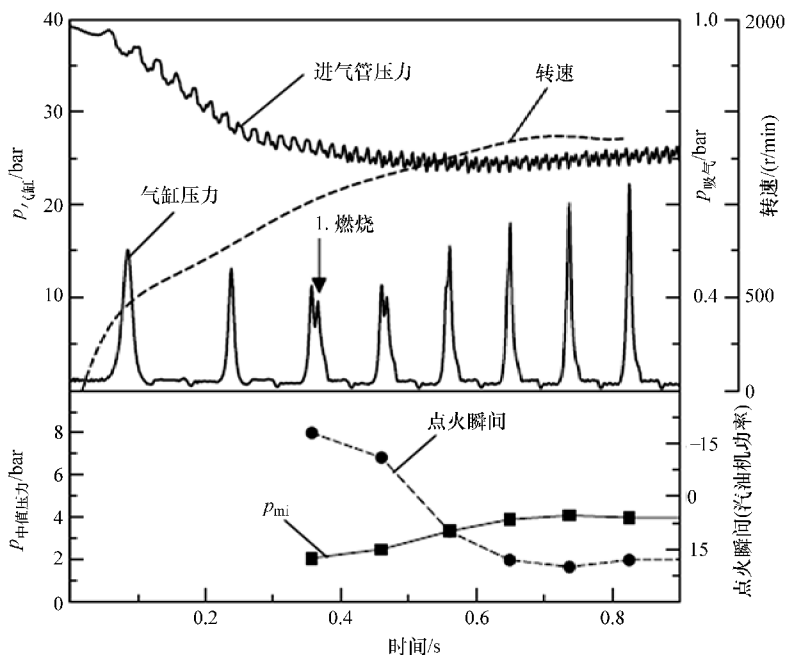


图 3.12 丰田雷克萨斯起动过程

通过发电机转速调节的 E - CVT (电动无级变速) 使发动机在约 1s 内将转速提高 1000r/min。通过进气管节流和延迟关闭 (阿特金森循环) 气缸充气量减少, 点火极为滞后。经过两个滞后循环, 气缸内的汽油燃烧, 这样一来, 这个工作循环由于能量转换滞后而变得柔和。也就是说, 第一个工作循环中排气温达到一定温度, 使三元催化转化器从一开始就正常地工作。丰田采用的这一技术使三元催化转化器中的氧气与辅助喷入的燃料在特定的起步阶段中进行燃烧, 从而排放量维持在低水平。

3.2.3 电力驱动

在 3.2.1 中提到, 如车辆在极低速行驶时, 发动机处于部分负荷工况, 效率较低。混合动力汽车可以电动驱动, 因此遇到上述情况时, 可以让发动机停止工作, 纯电动驱动, 从而避免发动机在部分负荷下运行。电池电量下降到临界值或者出现更高的负荷需求, 发动机开始工作, 在驱动车辆的同时为电池充电, 从而保持高效率工况, 如图 3.13 所示。雷克萨斯 RX400h 以 60km/h 以下的速度匀速行驶, 交替使用纯电动驱动和发动机驱动, 这一技术又称为“电池保护技术”。图 3.14 表示的是匀速行驶中循环时间与速度的关系。

插电式混合动力汽车使用发动机作为增程器, 这一方面跟其他混合动力汽车的情况有所不同。根据电池容量不同, 插电式混合动力汽车的纯电动驱动里程往往是中长距离到长距离。图 3.15 显示的是发动机以方式不同接入。

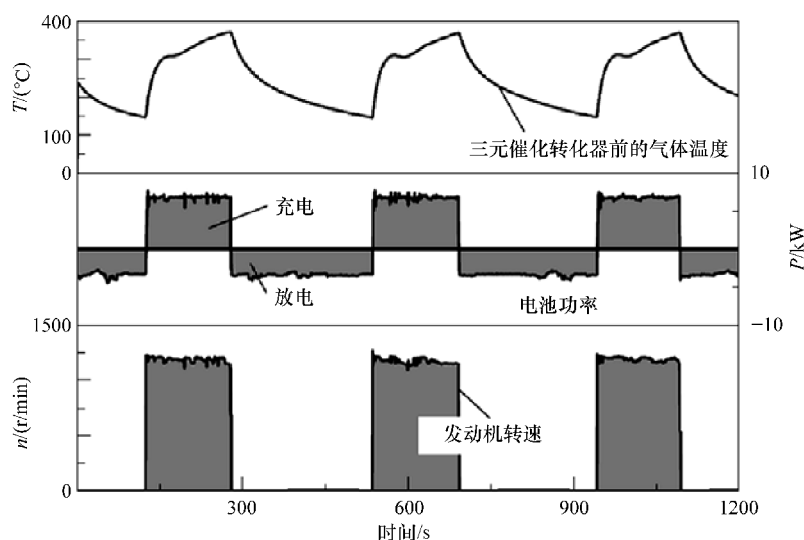


图 3.13 雷克萨斯 RX400h 在 60km/h 匀速行驶下的循环驱动

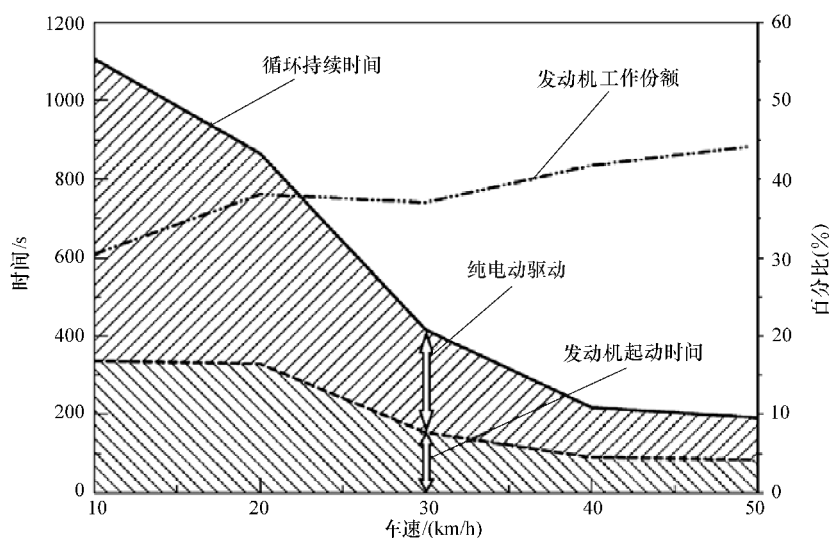


图 3.14 雷克萨斯 RX400h 在充满电池状态下匀速行驶的循环时间

第一种方式是驾驶人自选模式。当行驶路段上有加油站时，或者该路段只允许纯电力驱动的情况下，又或者该路段可以回收制动能（下坡）时，自选模式是合理的。第二种方式，电池电量下降到临界值时，发动机开始工作。第三种方式是发动机除了为电池充电以外，还满足更高的负荷需求。在高负荷需求时，发动机保持高效率工作，这种情况下，发动机在电池电量下降到临界值之前开始工作。增加舒适性的操作也可能影响这种发动机接入方式，如使用空调。

关于发动机的停止和起动，在“3.2.2 起/停系统”中有一系列详细的标准和要求。与采用起/停系统的车辆起步时的情况相反，电动驱动中的发动机再起启动较为复杂。在串联和功率分流式混合动力技术中，两台电机使汽车再起启动相对容易。在任何行驶状态下都要保

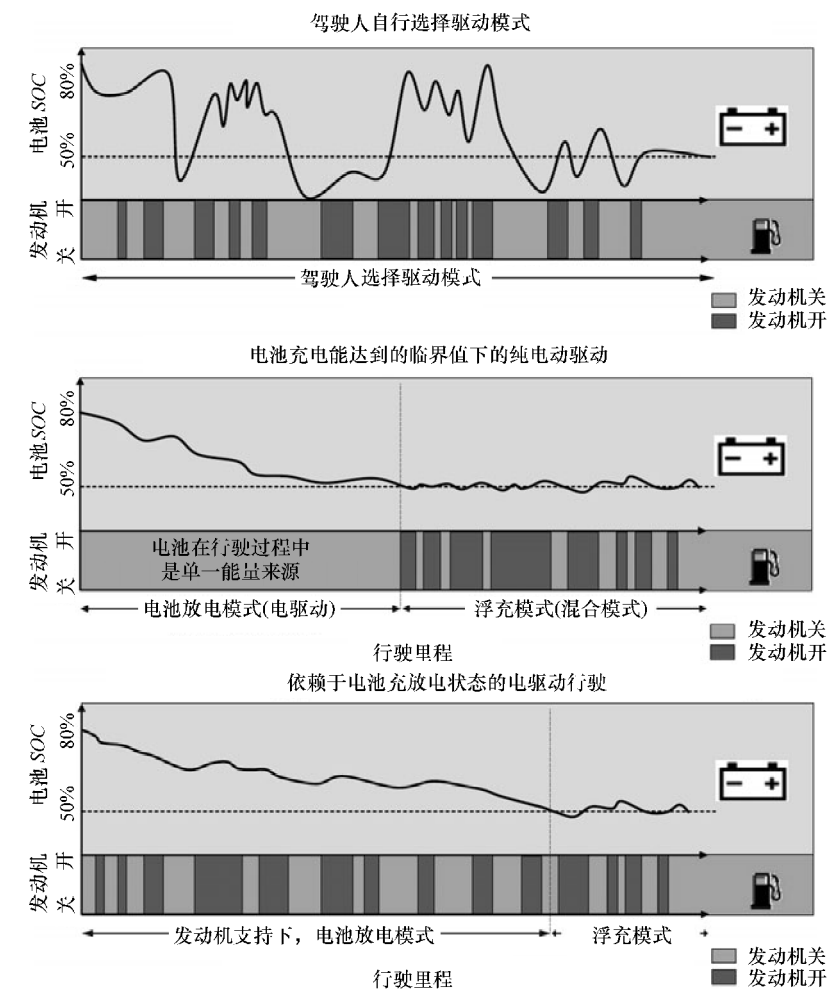


图 3.15 带增程器的插电式混合动力汽车的不同驱动方式

持舒适,也就是行驶过程中不能出现明显的干扰和颤动。

更大的挑战在于:只配备一台电机的并联混合动力技术如何在电动驱动阶段再次起动发动机。根据全混合动力,这一问题得以解决。图 3.16 是保时捷卡宴混合动力系统的动力总成。带转子和定子的电机、分离离合器 K0,以及自动变速器中变矩器的锁止离合器,构成了这个混合动力模块。

图 3.17 体现的是纯电驱动时的电机可支配的转矩。最大转矩中必须有一个“转矩储备”,如 $50\text{N}\cdot\text{m}$ 或 $100\text{N}\cdot\text{m}$,保持未使用状态,其目的是在再起动时,这一个转矩通过分离离合器耦合带动发动机。没有这一储备,起动时的转矩会明显减小。

在图 3.17 中标示出在电力驱动中(电机驱动)每个档位的行驶阻力包括加速阻力 (0.5m/s^2)。阻力线与下行的转矩线的交叉点必须起动发动机(否则纯电动加速度不够)或切换到更高的档位。

该图下半部分的档位示意图明显表示出,在这一布局中也可以只循序渐进地加速。这个例子说明为电动驾驶准备的“转矩储备”可能表现为相当大的限制。 $50\text{N}\cdot\text{m}$ 的转矩在起动发动机时还不足以冲破第一个死点(此时需要一个双倍的转矩)。图 3.18 表示出的新起动

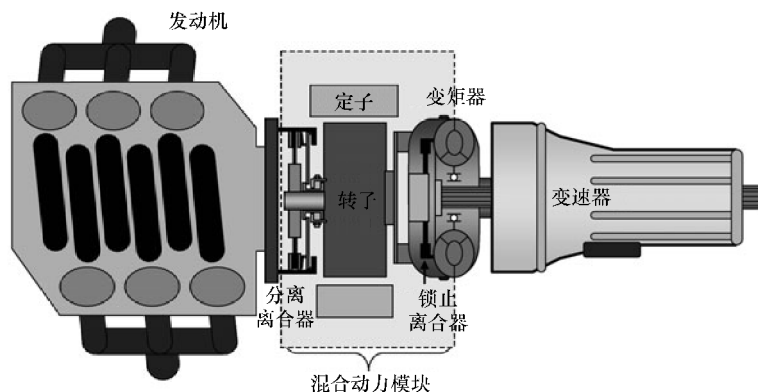


图 3.16 保时捷卡宴混合动力系统

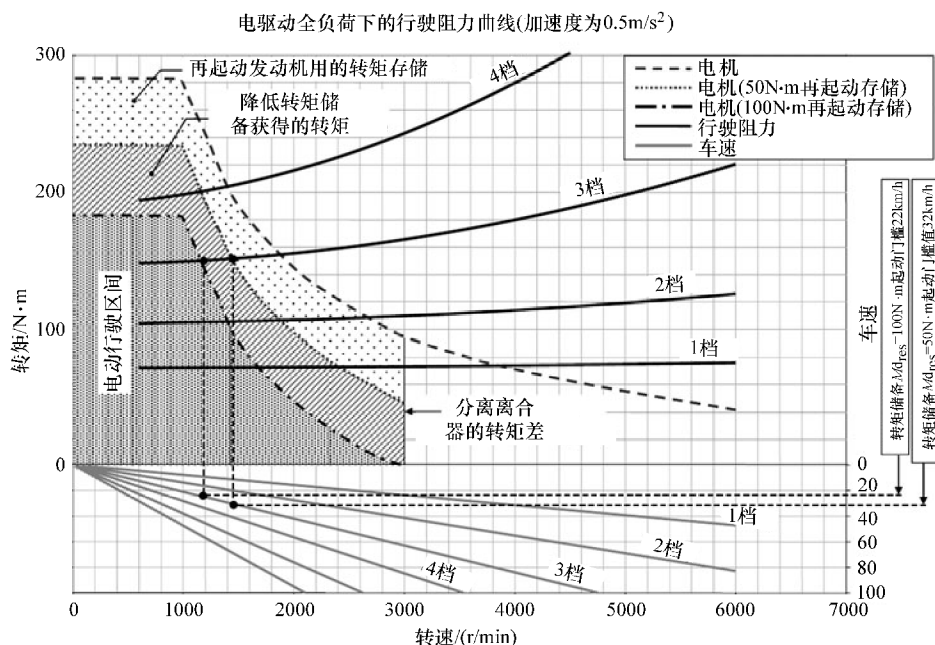


图 3.17 电机驱动行驶的转矩分布以及再起动的转矩存储

技术可以解决上述问题：

阶段1：输出轴去耦，接到发动机再起动的信号时，自动变速器的变矩器中的锁止离合器从锁闭状态转为滑移状态，所以无论变矩器在哪个工作状态，同样的转矩被导入到变速器中（锁止离合器上的转矩与变矩器上较小的额外液压转矩）。

阶段2：需要一个电机，覆盖从转子转速到为输出轴提供的一个有针对性的转速范围。

阶段3：在该状态下，分离离合器可以获得约 $100\text{N}\cdot\text{m}$ 的转矩，使发动机开始从转动到完成第一次点火。转矩大导致电机转速降低，因为转矩储备只有约 $50\text{N}\cdot\text{m}$ 。

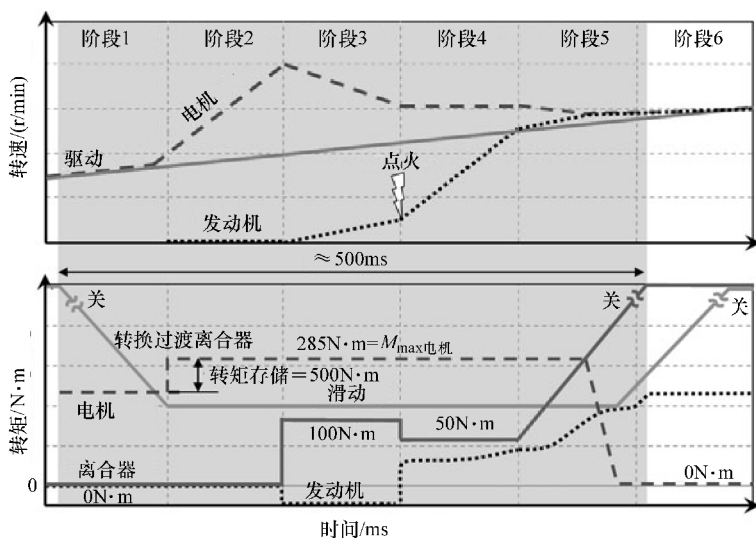


图 3.18 具有较小转矩存储的起动方案

阶段4：将分离离合器上的转矩减小到约 $50\text{N} \cdot \text{m}$ 可以防止电机转速继续下降。发动机现在可以加速工作，从“自力更生”到使输入轴和输出轴的转速同步。

阶段5和阶段6：现在分离离合器和变矩器锁止离合器相继完全被锁止。

这个例子说明，为了使起动又快又稳，需要昂贵的开支和精确的流程控制。

电力驱动的一种特殊情况是所谓的滑行。这种情况下动力总成在没有在起动装置帮助下工作，也就是说，发动机和电机都不工作。然而在电力驱动中应该注意的是，电机负荷低时效率也低。

最后要注意的是，所谓插电式混合动力汽车就是指它的主要能量首先来源于外网充电，可再生能源、热能和核能发电在某些情况下可以获得非常明显的二氧化碳减排效果。

3.2.4 能量回收

车辆每次制动或减速，动能通过制动器或通过发动机制动作用转化为热能。混合动力汽车可以将这种动能通过发电机转化为电能，并储存在电池内作为备用。混合动力汽车的节能潜力在 $4\% \sim 10\%$ ，这一比例很大程度上取决于混合动力技术和动力总成各组件的大小。影响节能的因素还有电池的最大容量和最大充电电流。出于对电池寿命的考虑，充电时不能超过上述极限值。

原则上，能量回收策略根据制动需求分为两类：并联式和串联式的能量回收或再生。采用并联式能量回收时，摩擦式制动和发动机制动同时进行，也就是说驾驶人的制动需求根据一定的比例分配给两个制动系统。当制动需求超过发电机可供的制动力矩或受到车轮控制干预时，如电子稳定程序（ESP）干预，需要采用串联式能量回收时，先进行纯发电机制动，然后是摩擦制动，如图 3.19 所示。某些技术允许与发动机去耦，从而利用增加的发动机牵引力矩回收制动能。

为了使驾驶人持续踩住制动踏板时车辆不断减速，控制发电机、制动器和摩擦式制动器

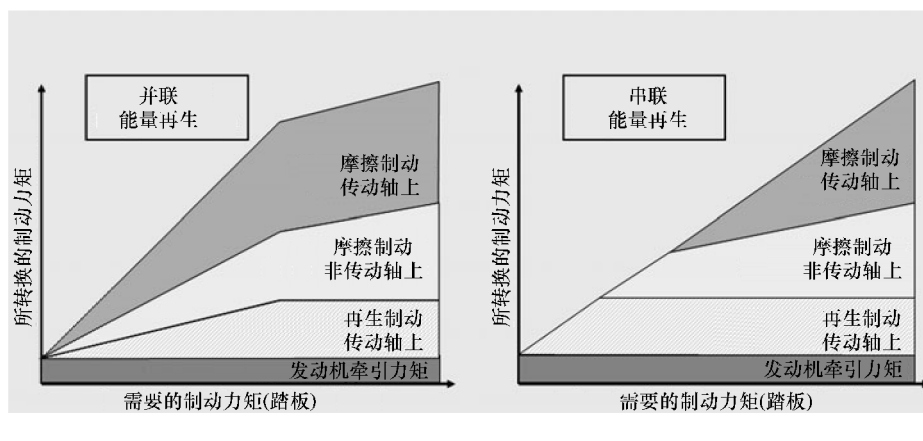


图 3.19 比较并联和串联式能量回收策略

之间的连接非常有必要。在一个以常规液压制动系统为基础发展而成的再生制动系统中，制动控制装置必须依赖于发电机的制动，也就是说制动过程调节制动压力，从而把在制动控制装置中制动力矩的分配放在首位。驾驶人的制动行为通过制动踏板的位置来识别。通过制动踏板传感器和位移传感器，检测到制动请求。混合动力行驶控制装置根据发电机电矩和即时变速比计算出当前可供支配的电动车轮制动力矩，并将其传递到制动控制装置。

回收制动能的可行性需要将常规制动系统与混合动力控制单元集成一体，形成一个机械和电气组件构成的附加网络，如图 3.20 所示。常规驱动单元如发动机、变速器、变速杆和制动器，已经通过各自的控制装置高度相关。而混合动力汽车又加入其他的元件，如动力电池管理系统，以及电动机控制单元和混合动力交叉控制单元，即混合动力行驶控制装置。这一装置的作用不仅仅在于向发动机和电机传递驾驶人通过加速踏板能反映出的加速意图，还能协调制动过程。

图 3.21 所示为车辆在回收制动能时的功率流。空气阻力、滚动阻力以及起动机械辅助装置（如空调压缩机、油泵和水泵）会造成动能损失。考虑到发电机的综合特性曲线和电池的充电状态（充电接受性）等情况下产生的能量损失，一个智能的能量管理系统把必需的制动功率分配到车轮制动器和发电机的输入轴上。

一辆重 1500kg 的轿车在新欧洲行驶循环测试中计算出的可以回收的制动能的最大值约为 1400kJ，如图 3.22 所示，已将滚动阻力和空气阻力的造成的能量损失已经考虑在内。将发电机和电动机的平均工作效率设定为 70%，包括蓄能器存储和释放能量，得出的整体效率约为 $0.7 \times 0.7 = 49\%$ 。用于驱动的能量也只有约一半即 700kJ。这一能量表示新欧洲行驶循环测试中节能最大值为 0.5L/100km。

在实际工况中，由于使用电池管理系统防止电池过度充电，往往无法达到上述节能潜力。在预测路段情况以及通过相应的技术使电池在能量回收之前调控充电量时，可以明显提升节能潜力，参见“5.2 运行策略”中的预测功能。

图 3.23 显示丰田雷克萨斯在高速公路上行驶时所测得的轮毂轴头转矩曲线。测试中一开始迅速加速至约 130km/h，然后保持这一速度，使速度—时间—路线的关系保持稳定。70s 后，由于交通状况出现两个滑行时段。

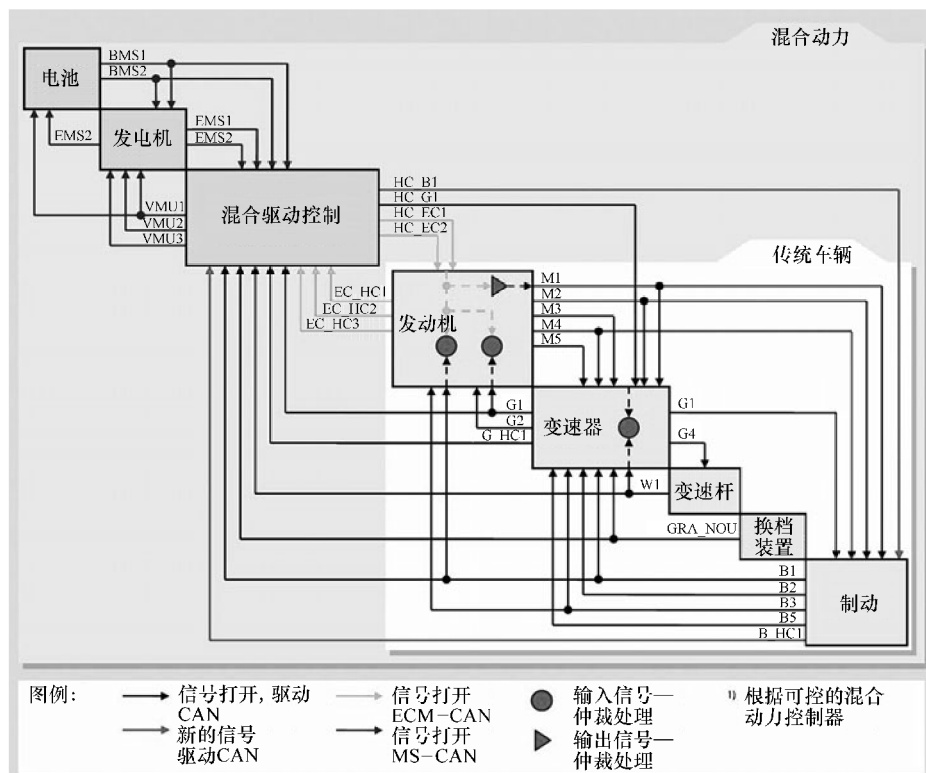


图 3.20 传统车辆和混合动力车辆的信号传输流程

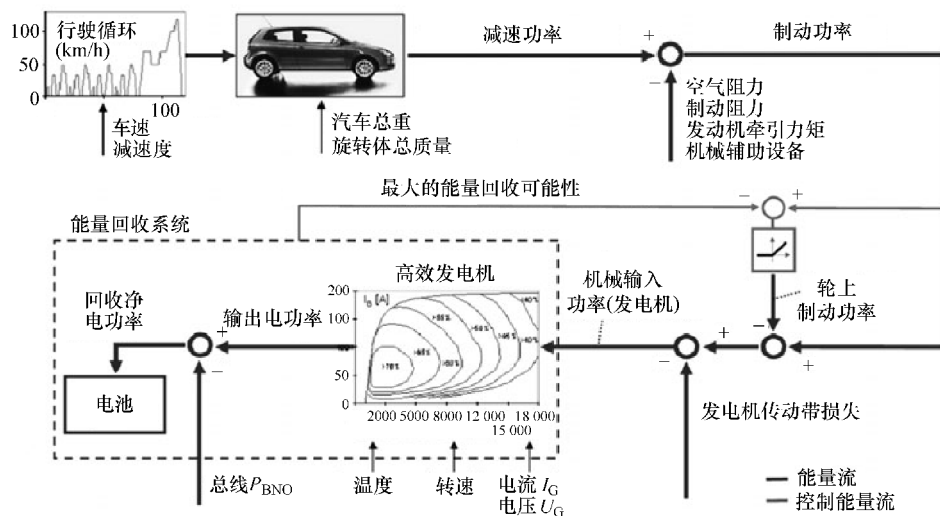


图 3.21 具有能量回收的车辆功率流

车轮的转矩走向显示出能量回收过程，而且是不同的能量回收技术。同时，后轴也暂时参与能量回收。作用于后轮上的推进转矩在此相对较小。这一曲线跟在城市行驶一样，因此

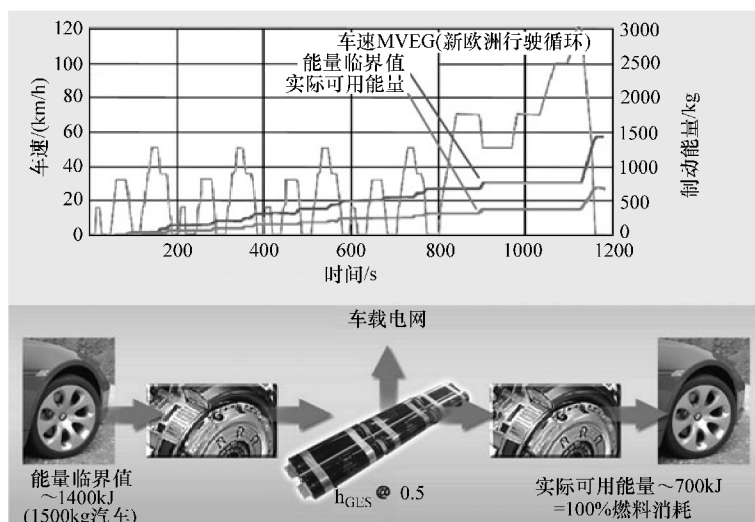


图 3.22 制动能量的使用

说明制动过程中能量回收有限。

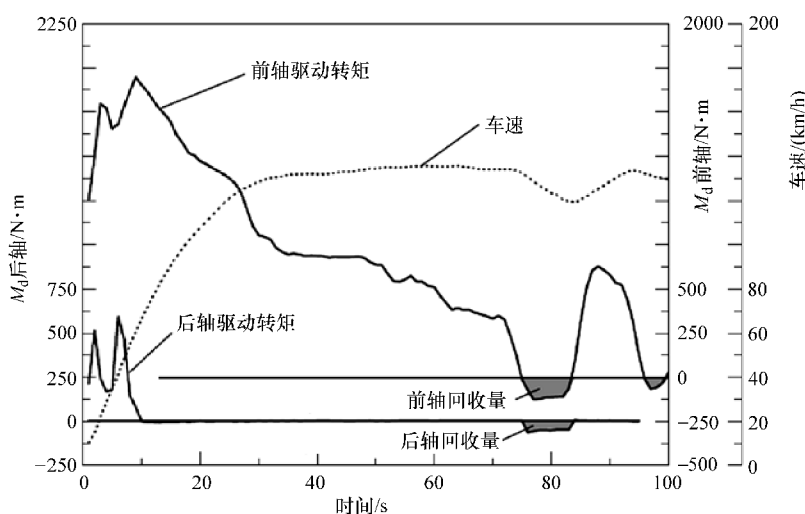


图 3.23 雷克萨斯 RX400h 车辆在高速公路行驶时的能量回收区间

3.2.5 小结：节能潜力

混合动力汽车的燃料节省潜力与动力混合的方式、比例和运行状态高度相关。雷克萨斯 RX400h 在平均速度下的省油优点体现在图 3.24 中，这一结果来德国自杜登霍芬的欧宝试车场。搭载 V8 汽油机的雷克萨斯 RX400h 被选作对比测试模拟车辆，V8 汽油机与该车达到几乎一样的功率。

省油的主要途径不是靠制动和减速回收能量，而是将 8 缸发动机换成 6 缸发动机，同时

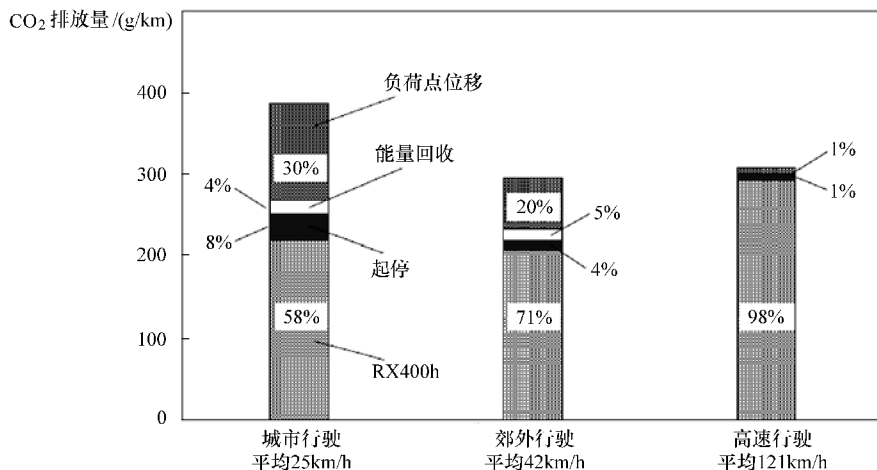


图 3.24 不同类型混合驱动的燃料节省比例

用 E-CVT（电动无级变速）代替相应的工况点位移。电动无级变速能对转速降低进行优化，从而改变发动机其他工况点。

通过能量回收的节能比例仅为 4% ~ 5%，在德国吕根岛的电动车试车中几乎得出同样的能量回收值。这表明回收能的理论值只有一部分可以利用。为了保证电池的寿命，充电状态被限定在一定范围内，电流大小也因此受到限制。

使用起/停系统的车辆，也就是微混合和中度混合动力汽车，其省油潜力在城市循环中为 8%，在长途旅行中为 4%。据估计，该潜力随着平均速度的提高而减弱。

图 3.25 为一辆中档中度混合动力汽车在新欧洲行驶循环测试中的模拟计算结果。该车

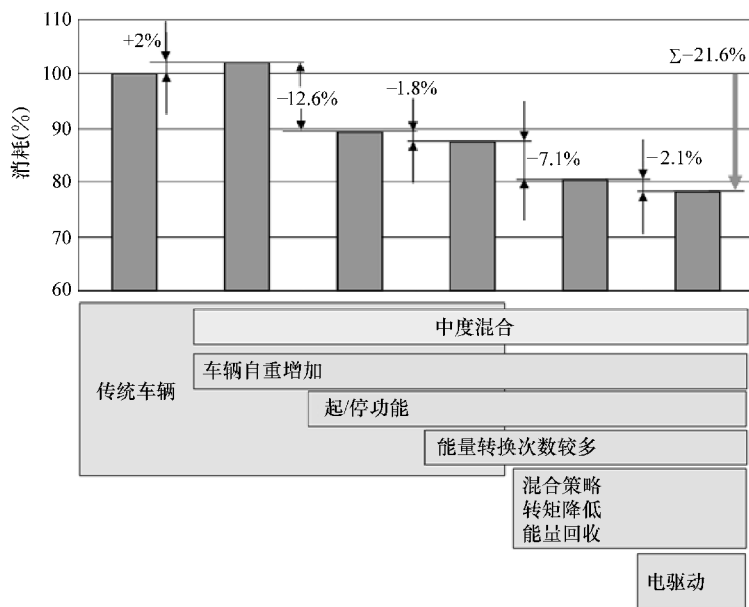


图 3.25 在新欧洲行驶循环测试中，一台中度混合的汽车不同省油措施所起的作用

配备柴油机、自动变速器，柴油机和电动机之间配有分离离合器，可以纯电动驱动。模拟测试以正常运转温度下的动力总成和排气总成为基础。由于混合动力元件使汽车自重增大，因此比常规汽车多耗油 2%。起/停功能在测试中省油 12.6%。在发动机和排气系统在正常工作温度下，该功能被激活，车辆起步时，自动变速器的转矩大于车辆静止时。由于后桥变速比大，又省油 1.8%。电动机的升压加速功能保持甚至增加了驱动轮上的牵引力储备。能量回收和负荷点位移又降低 7.1% 的油耗，而低速时纯电动驱动省 2.1%。整体省油潜力达 21.6%。在实际行驶中，由于使用增加舒适度和减排的微调措施，无法达到省油的理论值，但插图显示了各个省油措施之间的关系。

3.3 排放和噪声控制

除了降低油耗之外，发展混合动力汽车的另一个重要的动机是减少排放。由于符合未来排放法规定的措施如微粒滤清器、SCR 系统（选择性催化还原系统）和脱硝催化剂等越来越复杂，也越来越昂贵，混合动力系统可以达到减少污染物排放，并有其发展的意义。虽然混合动力汽车比尾气后处理系统贵得多，但这类车具有既减排又省油、性能好和功能齐全等明显优势。在某些区域中，降噪也是其重要优势之一。

与省油相似，根据混合动力技术的差异有不同的减排策略。

3.3.1 零排放电动行驶

当混合动力汽车可以电动驱动时，对当地而言减排和降噪都达到最优效果。尽管如此还必须注意污染物的排放与能量转换方式有关，如行驶中发动机为电池充电提供动能，或插电式混合动力汽车所需的电能由发电厂供给。电力驱动的必要性体现在噪声和排放等敏感区域，如城市中心、行人专用区、历史古迹等区域。例如伦敦就有一条规定，混合动力车辆免收进城通行费。

3.3.2 负荷点提升

混合动力技术最大限度地将驾驶人对传动链的负荷/转速的要求和发动机负荷/转速分开，使发动机在排放值优化的特性曲线区域内工作。发动机输出轴上的机械能跟传动链上的转化成动能的机械能之间的差额由电池进行补足。串联式混合动力技术由于发动机跟传动轴两者完全隔离，具有巨大的减排潜力，简单的串联混合动力技术通过增加或减小发动机的转矩实现减排，并能与转速联系在一起。这样就使省油成为核心问题。比如柴油机的特性区域中可能出现低氮氧化物排放高油耗，也可能完全相反，如图 3.26 所示。此外，每次能量转换都意味着能量损失，这是混合动力汽车要提高能效必须注意的问题。这就需要智能操作策略和相应的加权要求在节能和减排之间找到一个平衡点。

另外一种替代的燃烧方式，如在一固定场范围内燃烧，完全可以通过混合动力技术解决。以 HCC-I 均质充量压缩点火燃烧为例，由于废气再循环率以及降噪、舒适性的需要，这种燃烧过程的负荷和转速都被限定在最低范围内，如图 3.27 所示。该燃烧过程使用一种均匀的空燃混合物。在一般情况下，气缸充气的温度由于高废气再循环率而升高。空燃混合物经过压缩产生高温高压条件以及废气循环产生的原子团引起吸入物在整个气缸中同时点

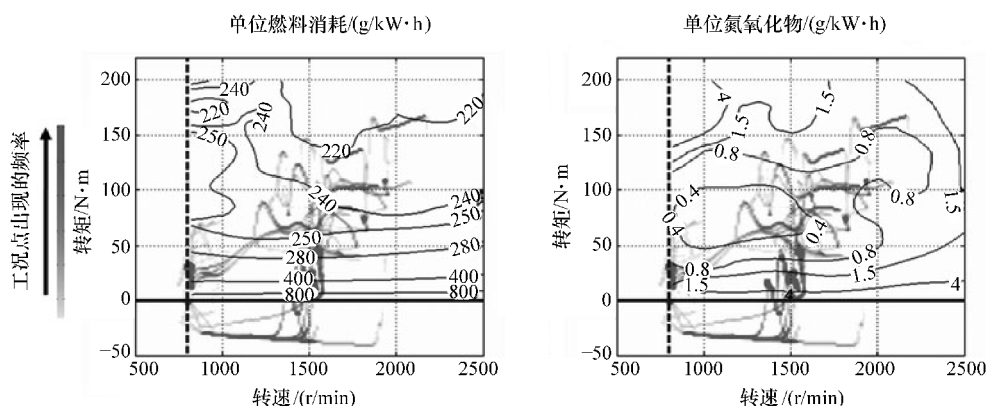


图 3.26 现代柴油机在新欧洲行驶循环测试中的工况点频率和相应的能耗和氮氧化物排放图

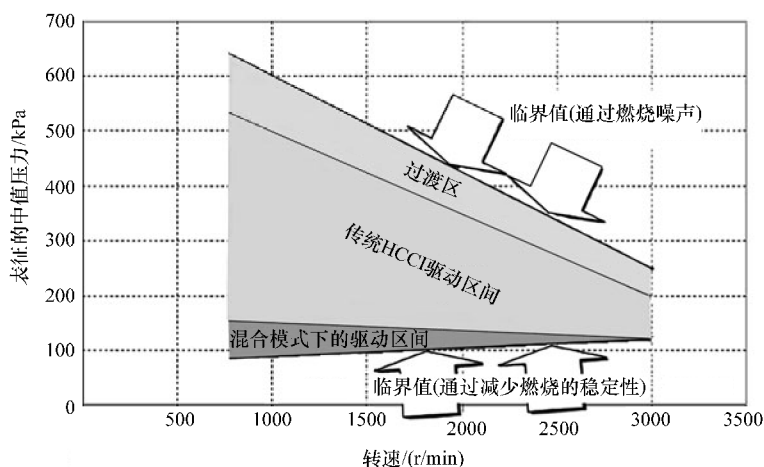


图 3.27 HCCI（均质充量压缩点火器）在转速—负载场的驱动区间

火，迅速燃烧，同时峰值温度保持在氮氧化物形成的温度以下，因此燃烧重心位置在达到上止点后十分有利。该燃烧过程最大的优势在于氮氧化物排放有限，因为在三元催化转化器内无氮氧化物需求。发动机可以利用低配合比的空燃混合气工作达到更高的效率，其他燃烧过程往往与氮氧化物存储催化剂或者通过 SCR（选择性催化还原）系统搭配才能达到该效率。该燃烧过程的缺点在于正确设置充气比例较为复杂，而且前文介绍到该燃烧过程的负荷和转速都被限定在最低范围内。大多数情况下，只能在短暂的加速阶段可以冲破负荷和转速的最低范围，而在混合动力汽车上可以由电池或电驱动组件实现。采用混合动力技术可以使发动机继续在均质充量压缩点火方式下稳定工作，同时保持氮氧化物低排放。从均质充量压缩点火燃烧方法向常规燃烧方法动态过渡时，由于部分工作参数差别非常大，很难协调，反之也一样，所以以电机作为辅助，平衡转矩变动。

图 3.28 显示的是柴油机使用替代型燃烧过程的工况。上文提到，短时间加速形成高负荷需求，超出替代燃烧的范围由电机功率覆盖。由此可以同时有效降低油耗和氮氧化物排放。

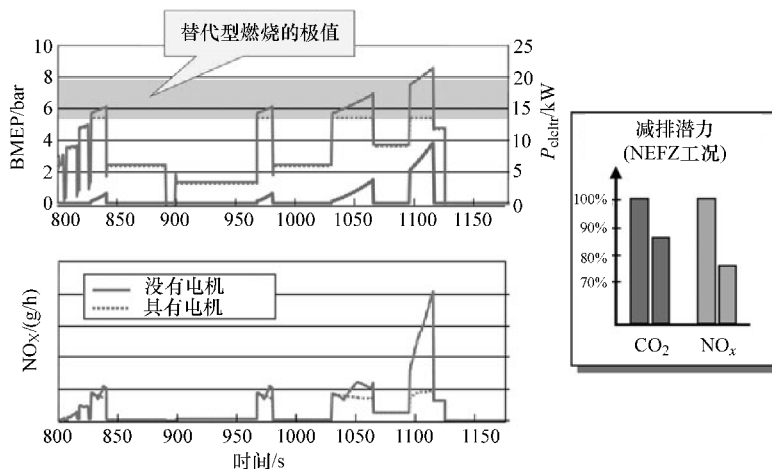


图 3.28 电机支持的柴油机（具有替代型燃烧过程）

通过负荷点提升达到减排目的的一个特殊情况就是所谓的发动机迟滞。在这种情况下，由电动机覆盖短暂的转矩变化，发动机缓慢地达到新的转矩要求。其优势在汽油机上体现为防止短暂加速所造成的气缸内油气混合浓度增加。

柴油机迟滞所带来的减排潜力更大。降低柴油机氮氧化物排放通过高废气再循环率实现。下面以柴油机为例：加速时，需要的转矩剧增，就需要增加喷入气缸的燃料。这就要求气缸吸入的空气量增加，否则会导致空气系数降低，而微粒排量剧增。由于不能使进气压力也就是空气量任意剧增，只能采取使废气再循环受阻或减弱的措施，使空气量相对迅速增加。这一措施一方面使废气不再替代空气，另一方面为废气涡轮提供更充足的废气。当进气压力达到相应的程度且空气量增大时，废气再循环率才能提高。其缺点在于，随着废气再循环率下降，柴油机氮氧化物排量增加。协调柴油机、微粒排放和氮氧化物排放之间的关系一直是需要克服的技术难关。混合动力技术可以使柴油机工况迟滞，也就是说进气过程减缓，同时其废气再利用率稳中有升，从而避免微粒和氮氧化物排量增加。为了保证这三者之间的协调，柴油机在加速出现的转矩不足由电动机弥补。图 3.29 对比常规和柴油机迟滞协调后负荷变化，以及废气中的氮氧化物浓度。

图 3.30 是在电机辅助下，柴油机负荷变化过程中相应的氮氧化物排量。一般情况下，该应用所需电功率相对有限，因此可以通过中度混合动力技术实现。

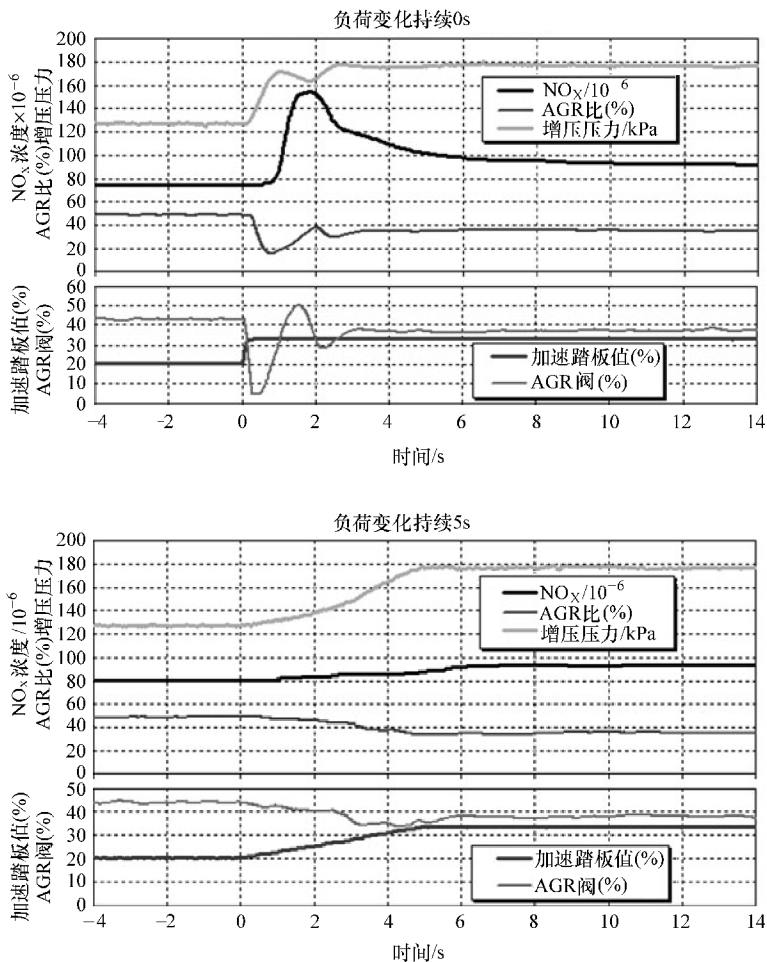


图 3.29 在常规即迟滞技术下，负荷变化对增压压力、AGR（废气再循环）比和氮氧化物浓度的影响

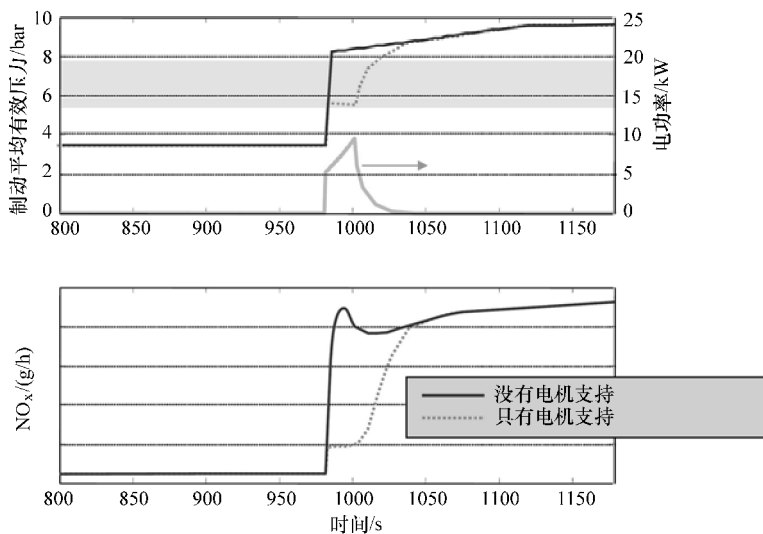


图 3.30 在电机辅助下，柴油机负荷变化过程中相应的氮氧化物排量

3.3.3 起/停技术

起/停技术的应用可以达到进一步减排的目的,参见章节3.2.2。尤其是柴油机的氮氧化物减排量与车辆停滞的时间相关。虽然起/停系统最重要的功能是优化发动机起动过程,但由于废气再循环不足,所以起动的时候一定程度上出现氮氧化物排放峰值是不可避免的。

3.4 功能性

混合动力总成通过新组件和系统的应用使车辆的功能性得到延展,更确切地说,优化了车辆的行驶动力学特性。

3.4.1 E4WD——电动四驱

混合动力技术配合四轮驱动有两个技术上的发展主方向。其一是性价比高的四轮驱动,即适时四驱,即由四轮驱动调节器分配传动轴上的转矩;其二是全时四驱。

(1) 适时四驱

适时四驱的全轮驱动功能性受限。其目标是在低速范围内提升牵引力。

主要要求:

- 1) 在低摩擦系数时提升爬坡能力。
- 2) 低速范围内使用电动推进。
- 3) 雪地车位轻松起步。

(2) 全时四驱

全时四驱是一个智能四驱系统,既可以根据需要分配转矩,也具备混合动力汽车所拥有的节能减排的特点。

3.4.2 转矩矢量分配系统

效率更高的电驱动装置的适用范围较广泛,其安装位可以是在车辆从动力总成的促动器到电驱动轴的任何一个位置。鉴于其功能性,对车辆动力特性产生的积极影响表现在使用四轮驱动的最大功率潜力。车轮和传动轴之间的传动力矩,车辆前后桥之间的传动力矩都可以实现自由分配,也就是所谓的力矩矢量分配系统。

转矩矢量分配系统如应用于后桥,可以影响车辆的动力学性能。借助车轴之间定向和可变转矩分配形成一个偏转力矩,对车辆的灵活性和稳定性可以产生决定性的影响和改善。示意图3.31左上为车辆转向不足以及前后桥、前后传动轴两端车轮之间预设的转矩分配。与之对应的左下图显示的是带主动纵向和横向转矩分配的车辆在同样情况下转向。通过减小纵向应力,部分分配到后桥的驱动力使前轮侧向力潜力有针对性地提高,通过该轴以避免出现“位移”效应。由于传动力不对称,主动改变后桥的横向转矩分配使车辆获得一个额外的偏转力矩,使该处转向不足的情况得以矫正。这样一来外侧后轮获得一个更大的动力,可以充分利用动力啮合潜力。通过减小内侧后轮传动转矩,侧向力有相应地提高该车轮力的圆周力的特性。与此相应的是通过部分分配到前桥的驱动力和提高后桥内侧车轮的转矩,在转向过度的情况下使车辆保持稳定,如图3.31右侧。

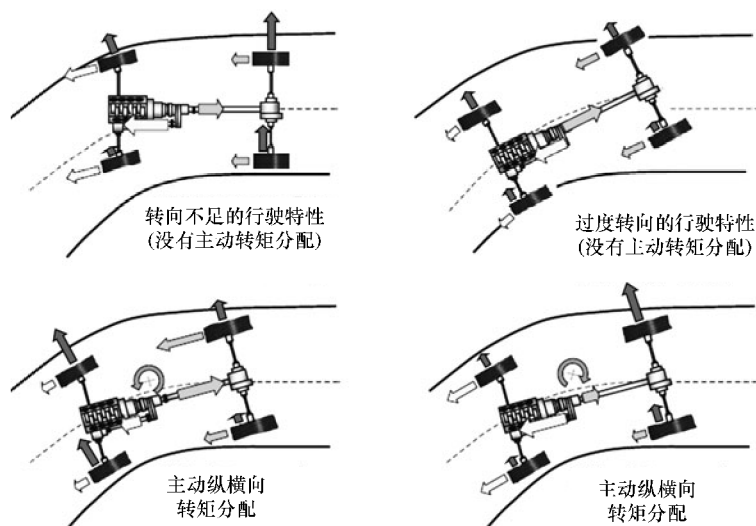


图 3.31 四驱车辆的转矩矢量运用

图 3.32 所示为后轴及行星轮差速器和与一台电机耦合的动力叠加单元。差速器对称地分配发动机的驱动转矩。在电机控制下，其中一个半轴所增加或减小的转矩与分配所得的传动力矩进行叠加，两个后轮得到不对称的牵引力，从而形成一个环绕车辆纵轴的偏转力矩。

功率需求与驾驶人的操作有关。为了达到提高驾驶性能这一目的，转矩矢量分配系统的反应速度必须在 100ms 以内。如此敏锐的反应需要大的电动反应转矩和较小的转动惯量。而常规 14V 车载电网无法满足这一敏锐度的电流需求。然而，混合动力系统为此提供了一个理想的解决方案：由高性能促动器（又称增强器）提供能量。

电机应用于后桥传动和分动器上的有效矢量控制系统

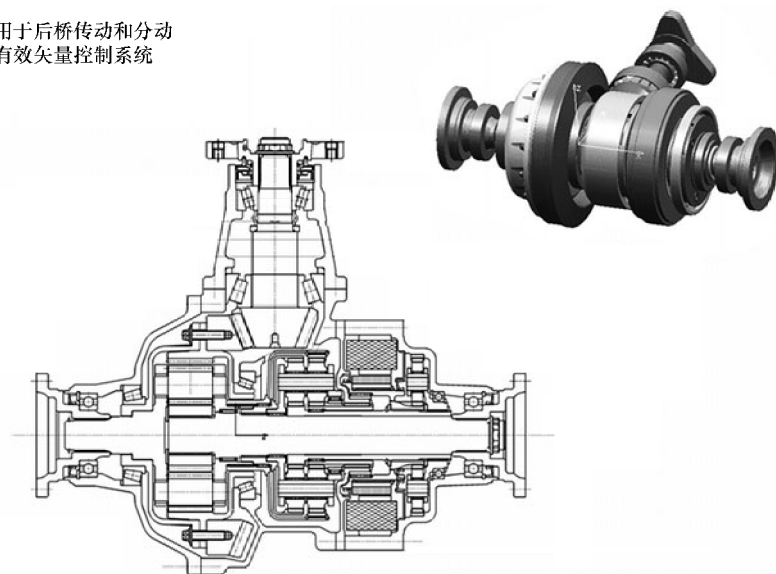


图 3.32 后轴驱动转矩平衡系统（电控）

图 3.33 所示技术为两台同样构造的电机集成在一台差速器内，由此既可以获得效率高的机械传动又可以通过一个开放式的常规锥齿轮实现车轮的转速差别。两台电机中任何一台都直接连接一个输出轴。在功能上两台电机相互独立，从而通过电功率通量实现电机的叠加传动。利用一个蓄能器基本上可以发挥所有混合动力功能。

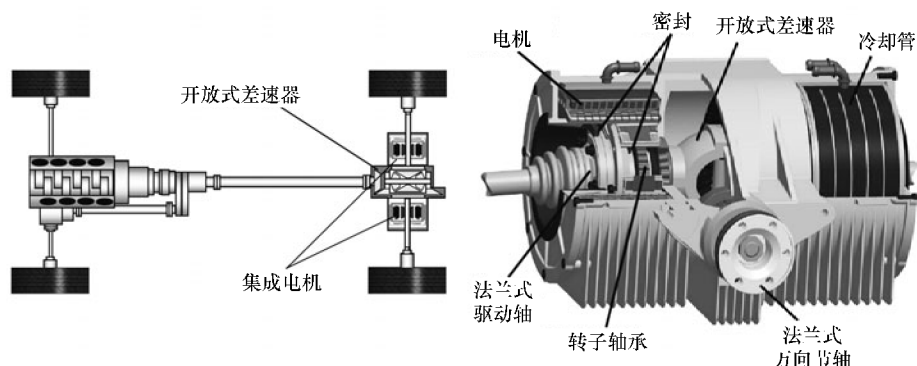


图 3.33 后桥转矩矢量化的混合驱动方案

转矩矢量

作为一个无需蓄能的系统，差速器可以用于分配每个车轮的转矩。在这种情况下，一台电机作为发电机工作，并且通过电功率分流为另外一台电机（作为电动机）提供相应的电能。在发电机的支持下，通过开放式差速器在机械功率分支中产生一个额外差动转矩。由此，可以形成近乎两倍转矩的转矩矢量，作为允许的电机转矩限值。因此在轴上的与转矩无关的车轮力矩被横向分配，车轮横向分配转矩被前移，以符合所需的可用动力啮合和当前的驾驶的情况。以图 3.34 为例，显示的是转矩矢量分配功能在摩擦系数分离的路面充分利用动力啮合潜力。

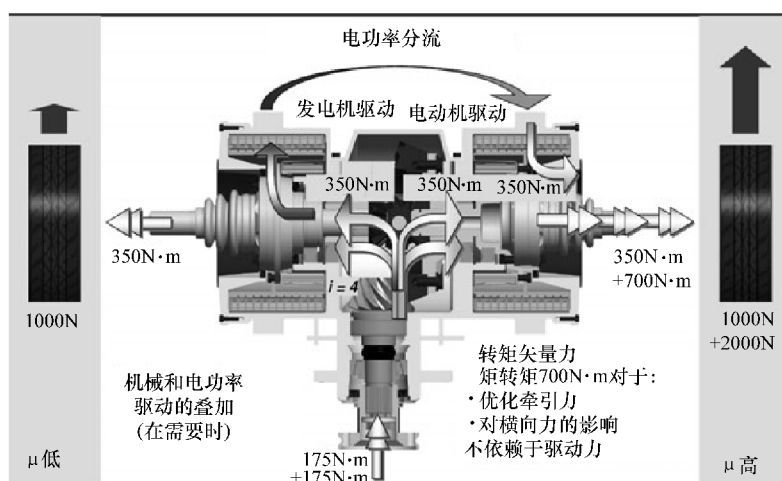


图 3.34 转矩矢量控制系统的转矩流原理图

除了影响车辆横向动力学特性以外，以电机为基础的促动器同样影响车辆纵向动力学上的分配。

图 3.35 所示为一个转矩矢量分配系统及功能性布局，如麦格纳斯泰尔汽车公司研发的黏性耦合装置（在此是指一个可控黏性耦合器，该耦合器由一台电动机取代）。该装置由作用于太阳轮的一组行星轮组和一台电机组成。转矩通过行星轮架输入，通过齿圈输出。

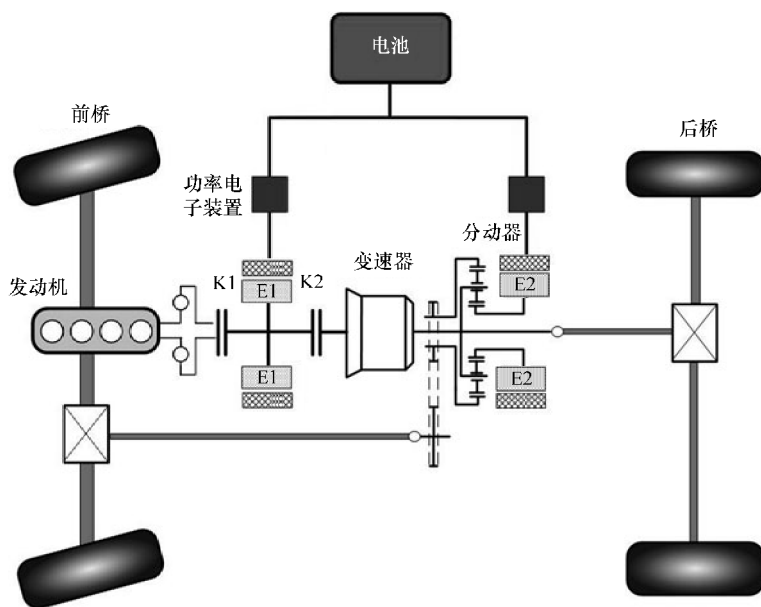


图 3.35 在车轴之间的全轮驱动转矩分配

电机的基本功能是作为标准的制动器。前后桥上的滑移率和太阳轮的转速有直接关系。当后桥出现滑移，电机对太阳轮进行制动，而转矩因此传递到前桥。在这种操作模式下，车辆前桥速度最大可调节到后桥的速度水平。这就是全时四驱。电机的扩展功能是带动电动机工作。在这种情况下可以使前桥速度大于后桥。

图 3.36 所示是用于带纯电动前桥的 SUV 和高档车辆的混合动力全时四轮驱动技术。电机 EM1 与离合器 K1 和 K2 共同构成一个并联式混合动力技术。此处与机械驱动分离的前桥由电机 EM2 驱动。

离合器 K3 可以使电机 EM2 从前桥分离。在 ESP/ABS 启动时，电机 E2 与前桥断开是必要的，否则电机的强大惯性会对制动系统的调节质量产生不良影响。

由于离合器不同的耦合组合，使两台电机既可以作为电动机又可以作为发电机进行工作，形成功能性和驱动模式多样化，包括从纯电动驱动前桥（非发动机驱动）到电机作为车辆驱动的辅助电源装置等众多功能。在如图 3.36 所示的配置下，再生制动装置可以通过前后桥回收制动能。

所有的混合动力技术在改变车辆的动力学性能时，都必须保证车辆动力学性能不受电池充电状况的影响。对驾驶人而言，该状况无法预计，甚至会导致出现非常危险的行驶状况。

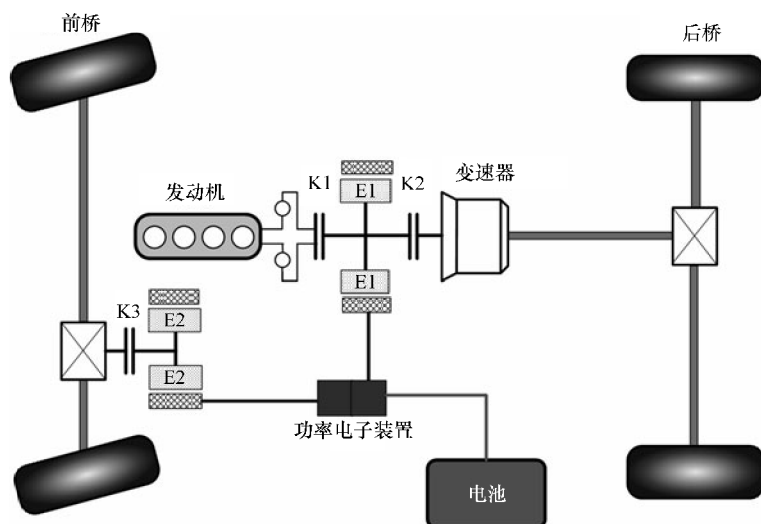


图 3.36 电驱动前轴的混合动力模式

3.4.3 供电—充电站

混合动力汽车不仅不断改进驱动技术，还需要其他周边设施的相应改善，比如解决在无电网覆盖地区的供电。以（道奇公羊“承包商特别款”）为例，这款混合动力皮卡搭载车载发电系统，如图 3.37 所示。这款样车配备并联式混合动力技术、单相 120V 60Hz、三相 240V 60Hz、最大功率 23kW 的额外发电功能。在这辆常规四驱车的变速器输出轴和分动器之间搭载一台功率低于发动机的电机，如图 3.38 所示。这台电机既可以作为发电机在建筑工地使用，又可以在行驶中作为三重并联式混合动力（变速器输出轴接电机的并联式混合动力技术）实现省油以及为车辆加速提供动力支持。这种特殊混合动力集合用户需要的众多功能于一身。

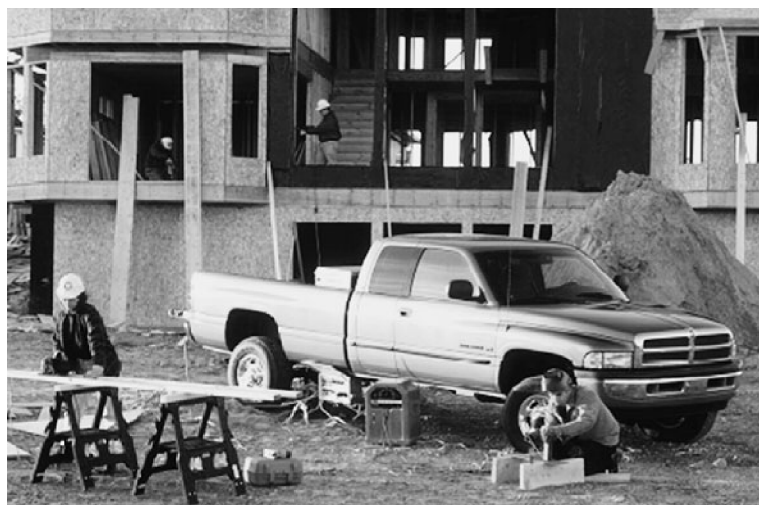


图 3.37 道奇公羊“承包商特别款”

通过车载废气再处理系统，当电机作为发电机使用时，污染物排放明显少于常规便携式发电机。这款车在美国的主要销售对象是在没有供电设施的建筑工地工作的承包商。图 3.38 为发电机工作中能量流图，由三相交流电机发电。作为缓冲器，电池通过整流器可以储存或释放电能。如果电网频率为 60Hz，发电机转速必须保持在 1800r/min。在改变电器负荷时，发动机节流阀所在的位置由发电机控制单元进行调控，以保证转速稳定。

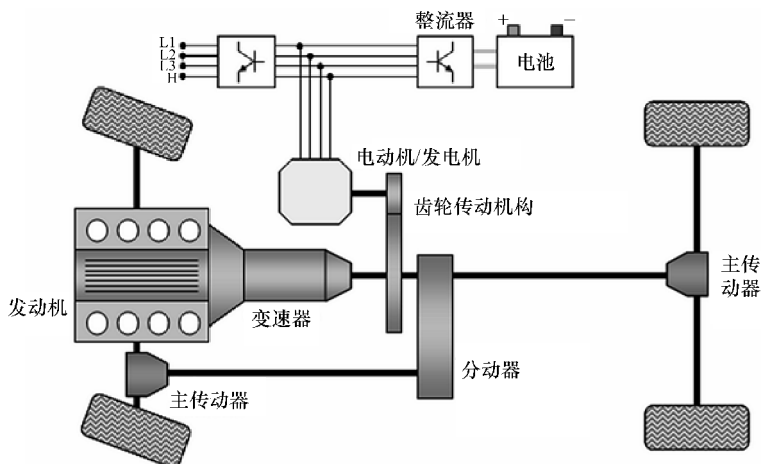


图 3.38 道奇公羊“承包商特别款”混合动力技术方案和能量流

4.1 发动机

按照惯例，混合动力汽车上的常规发动机跟另外一个能量转换系统，绝大多数为电功率驱动系统相结合。这一章简单介绍各种适用于混合动力汽车的发动机。主要介绍与混合驱动相关的特性、特点以及使用在混合动力汽车上的优劣势。除了常规的往复式活塞发动机以外，本章节还会介绍旋转式活塞发动机及燃气轮机。能量电池虽然不属于发动机，但因为其原理由燃料中化学能转化成其他能量形式，所以也将在本章进行介绍。

4.1.1 汽油机

汽油机和电动机具有特定的属性使两者能够非常契合地存在于混合动力系统中。通过控制进气门吸入空气控制常规汽油机负荷，造成部分负荷效率较低。根据不同的混合动力技术，通过提升负荷点和电动行驶，在省油方面具有较大的进步空间，柴油机也如此。最佳配置的是加载一台涡轮增压发动机（小型化技术），由于起步功率较弱（涡轮迟滞）可以由电动机进行功率补偿，从而可以更充分地利用汽油机的省油潜力。此外，一方面电动机在低负荷加速时提供转矩补偿，从而提高车辆性能；另一方面汽油机转速越快，空气流量越大，涡轮增压器运转越快，从而提早达到进气增压，从而一定程度上实现“增强”才是小型化技术有效的实施方案。在转速低时所具备的充足转矩（低速转矩）形成较大的变速器速比或轴变速比，从而达到使汽油机减速的目的，同时相应地影响油耗，参见“3.2.1 负荷点提升”。

特别是从舒适性的角度出发，在汽油机上配备怠速熄火系统可以达到显著的省油效果，但是起动和熄火时通过柴油机高压压缩产生强烈的转矩波动（熄火抖动）难以调节。汽油机成本明显低于柴油机，从而使高成本的混合动力技术更容易被消费者接纳。此外，汽油机在全球范围内的市场占有率高于柴油机。例如北美和日本，作为混合动力汽车的主要市场，柴油车的市场占有率相当有限。介于以上原因，迄今为止开发的大多数混合动力汽车都使用汽油机。

4.1.2 柴油机

带有直喷、增压和中冷器（TCI）的现代化柴油机为混合动力汽车上的应用显示出其省油的优越性，加之采用催化氧化器，大大降低了一氧化碳和碳氢化合物等有害物质的排放。

此外，与汽油机相比，柴油机特别是在部分负荷时，由于高压压缩比和燃烧过程中消耗大量空气，具有显著的高效率，从而降低排碳量。使用柴油机的混合动力汽车可以实现最低排碳技术，然而由于其本身油耗低，柴油机的省油潜力有限。柴油机相对重且噪声大，在废气后处理上需要针对微粒和氮氧化物的排放做出巨大的改进。喷油系统和增压系统已经是造价高昂，而总体成本还会因为废气后处理技术（微粒过滤、脱硝催化剂、SCR 系统）再度增加。然而，如果可以减少排气后处理技术的成本，从而节省整个混合动力系统的成本，该方案也将受到重视。采用迟滞技术减少氮氧化物排放以及提升负荷点使微粒过滤器再生，至少是柴油机在混合动力汽车中更具吸引力的两大技术亮点。

4.1.3 二冲程发动机

二冲程发动机最大的特点在于曲轴每旋转一次在气缸中形成一次完整的做功周期。因为发动机做功、曲轴的旋转频率固定，因此在最简单的情况下新鲜空气进入气缸和废气排出气缸可以直接通过活塞控制。

由于进气排气的方式、发动机构造和润滑功能方面使气缸中剩余混合气含量高（内部废气后处理），尤其是在部分负荷条件下，氮氧化物排量低。传统二冲程汽油机的油气混合在外部进行，在部低分负荷情况下点火中断造成高碳氢化合物排放。通过直喷过渡区的新鲜空气损失和碳氢化合物的排放大大降低。润滑油高消耗也是造成二冲程汽油机碳氢化合物排放高的原因之一。

二冲程发动机发出的特殊气味首先是润滑油产生的碳氢化合物。通过排气后处理，如二次进气、催化氧化器和氮氧化物储存催化器，二冲程汽油发动机的污染物排放量也可以显著减少。

采用扫气法、吹洗空气的供给方式以及所选的油气混合系统对二冲程发动机的具体油耗有重大影响。在低部分负荷时点火中断和高负荷时新鲜混合气的损失造成油耗偏高。

在过去的几十年内，二冲程汽油机主要凭借其有利的功率重量比、转矩特性良好和价格低廉的优势，广泛应用于摩托车、割草机、机动锯、游艇发动机等在省油和减排方面要求并不严格的范围。由于对小型发动机的排放要求也日益严格，在这些范围内使用的二冲程汽油机将逐渐被四冲程汽油机取代。

然而，二冲程发动机除了在本成本、性能、功率重量比、体积、耐用性方面存在巨大优势以外，还具有位置灵活和维护率低等特点，这就是其难以完全被四冲程发动机取代的原因。借助现代废气处理方法及油气混合形成过程，二冲程发动机得到特殊应用，如增程器，开拓了全新的和有前途的应用领域。

柴油机点火方式对二冲程的工作方式同样适用。与二冲程汽油机相比，二冲程柴油机的优势就是将燃料原则上直接喷入气缸。这样的发动机造价低，搭配涡轮增压技术，首先作为火车和船舶驱动装置。在未来也可能应用于汽车行业。

优势

二冲程发动机的工作原理决定其优势如下：

- 1) 因为无需气门控制，所以结构紧凑、重量轻、造价低；
- 2) 比功率高，由于行程数为双倍，所以发动机功率重量比低；

- 3) 由于部件工作次数少和工作周期长度减半, 使该发动机摩擦损失低;
- 4) 由于残留气体量大和平均压力相对低, 该发动机的氮氧化物排放量相对较低。

劣势

与四冲程发动机相比有以下劣势:

- 1) 复杂换气过程使该发动机在协调进气和排气系统(管道长度、气缸容积等)方面比四冲程发动机更为重要。简而言之, 只能在个别工作点才能完成一个完整的换气周期。
- 2) 扫气损失高造成高油耗以及非常高的碳氢化合物排放。
- 3) 尤其是在空转和低部分负荷的情况下, 大量剩余气体导致不完整做功, 其原因是在火花塞处剩余气体中的燃料成分导致重复错误点火。
- 4) 由于扫气损失、剩余气体含量以及控制时间选择上受限, 二冲程发动机可达到的平均压力明显低于四冲程发动机, 因此抵消掉其部分功率优势。
- 5) 气缸自润滑需求导致机油消耗大, 有异味。

4.1.4 旋转活塞发动机

目前旋转活塞发动机受到重新关注, 因为在具有同样高比功率的情况下该发动机比常规往复活塞发动机尺寸小和质量轻, 又称为汪克尔转子发动机, 结构紧凑, 可以作为增程器应用于微混合动力汽车上。

功能及结构

1954 年, 菲利克斯·汪克尔研发出四冲程三角活塞旋转式发动机, 也就是汪克尔转子发动机。其特点是有一个偏心轮装置和一个三角转子, 转子在茧形机体内旋转。

三角活塞旋转式发动机的工作原理为: 转动的偏心轮带动活塞在壳体内转动, 形成 3 个工作室, 随时间变化 3 个工作室的容积也不断变化, 如图 4.1 所示。工作室容积变化的过程中完成 4 个行程。偏心轮转动 3 次为一周。在转子的 3 个顶点以及侧面均进行密封处理。换气通过活塞环开口控制。缸体内部为摆线形结构。

转子绕偏心轮转动不产生离心力, 但通过在偏心轮中心的转子重量以偏心轮半径旋转会产生离心力, 而此时产生的离心力通过配重抵消。

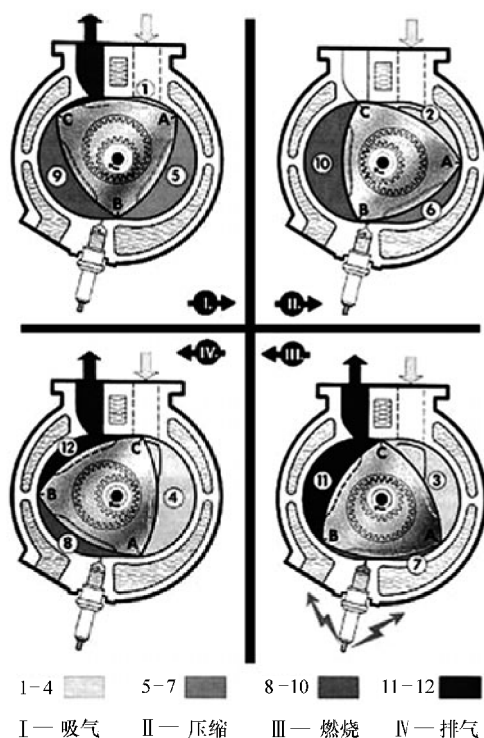


图 4.1 汪克尔转子发动机工作原理

优势:

- 1) 振动小、转速提升快;
- 2) 完美的平衡性;
- 3) 部件少, 无气门装置;
- 4) 由于进气口和排气口截面大, 无需增压就能快速完成进气和排气。

对上述优势进行总结, 得出该发动机比功率高、转矩稳定、结构紧凑、质量小。

劣势:

- 1) 燃烧室几何形状不规则以及淬火效应导致碳氢化合物排量较大;
- 2) 比能耗高;
- 3) 密封边缘长导致机油消耗量大, 也对排气质量造成不良影响;
- 4) 由于燃烧室的密封效果难以达到柴油点火的要求, 因此柴油转子发动机发展受限。

汪克尔转子发动机燃烧室几何形状不规则引起排放未处理等尾气质量问题, 并且油耗高。

4.1.5 斯特林发动机

斯特林发动机又称热气机, 其工作原理是在一个封闭的循环过程中持续进行外部燃烧。低温压缩, 高温膨胀。热能通过热交换器由外部引入, 对工质进行加热, 因此斯特林发动机可以通过任何外部热源进行工作。油气的加热和冷却不能通过蓄热能力强的外壁进行持续加热和冷却, 因此需要一个压缩活塞。

活塞推动工质在冷热腔之间往返流动, 如图 4.2 所示。这一周期性压力差通过动力活塞和曲柄连杆机构传动转换为机械能。斯特林发动机气缸内充有工质且无需更换。为了达到高效率和高比功率的目的, 一般采用氢气或氦气代替空气作为工质。

结构

斯特林发动机基本都有热腔(加热)和冷腔(冷却), 工质在两个腔之间往返流动。为了提高发动机效率, 在冷热腔之间有一个蓄热器, 也就是所谓的回热器。工质从热腔流向冷腔的过程中, 释放的热能被回热器吸收; 工质在从冷腔流向热腔的过程中, 重新吸收回热器中热能。

斯特林发动机通常为往复式发动机, 气缸的设计或有差异:

α 型: 由一个热工作缸和一个冷压缩缸组成。两个缸之间由一个侧流槽连接。

β 型: 只有一个气缸, 动力活塞和压缩活塞分别在冷腔和热腔中往复运动。

γ 型: 发动机具有较大的压缩活塞带冷端和热端, 并有小型工作缸, 该缸可以连接到热端或冷端。

功能

如图 4.3 所示, 斯特林发动机工作过程分为四个阶段, 即四个行程:

通过工质在热端受热膨胀, 推动工作活塞做功。压缩活塞有 90° 相位差, 且在这个阶段几乎保持静止。

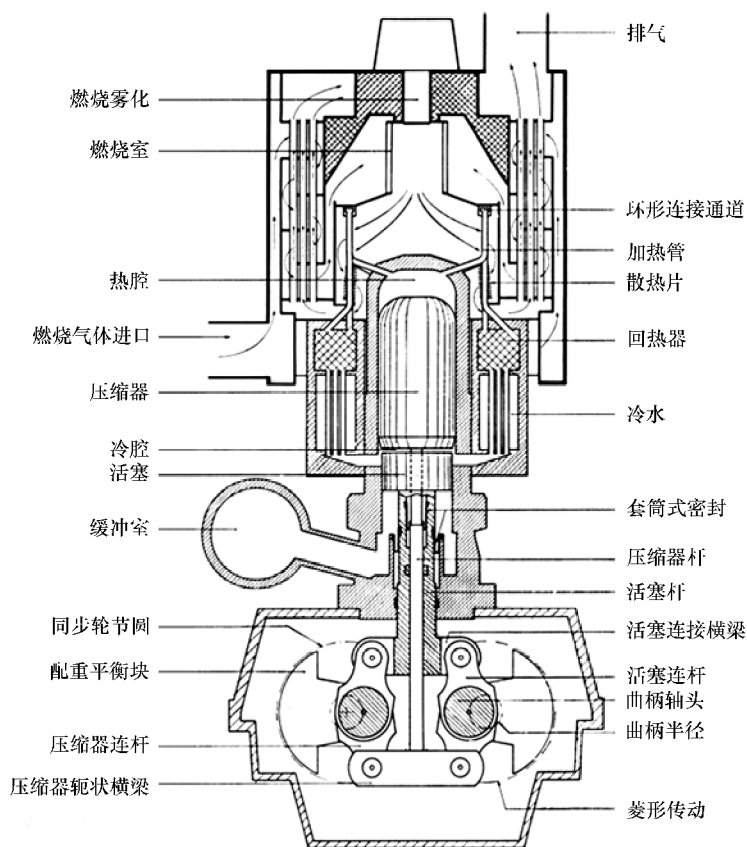


图 4.2 带菱形传动装置的单缸斯特林发动机

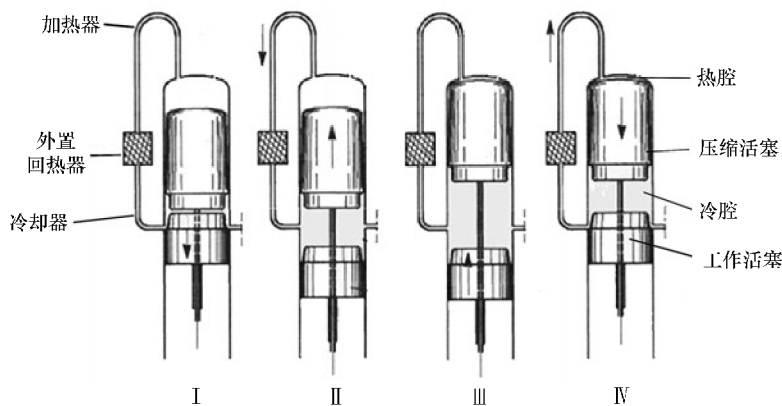


图 4.3 斯特林发动机工作过程简图

压缩活塞将工质由热端推向冷端进行冷却，工质通过回热器时释放热能。这一阶段动力活塞几乎保持静止，冷却导致气压下降。

工作活塞再次向上运动到上止点。

压缩活塞向下运动，使工质从冷端流向热端，并回收储存在回热器中的热量。

斯特林发动机理想循环中形成 4 个连续的热力学过程，如图 4.4 所示。

- 1) 1→2: 定温膨胀 (恒温);
- 2) 2→3: 定容储热 (等容);
- 3) 3→4: 定温压缩;
- 4) 4→1: 定容回热。

由于在发动机在连续运转时无法实现等容，所以现实条件下无法实现理想循环。

斯特林发动机的循环热效率理论值跟卡诺循环的理论值相等，但是理论值所表示的是在技术可以达到的压力和压缩比的情况下，柴油机和汽油机理想化的热力学过程。

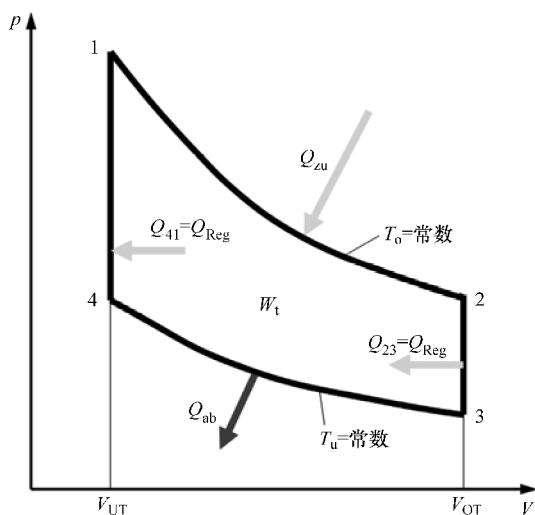


图 4.4 斯特林发动机的理想循环

排放与所选择的燃料有密切联系。斯特林发动机的燃料选择范围广，可以使用气态、液态和固态燃料甚至可以是太阳能。总体来说，斯特林发动机还是选择常规的气态和液态燃料，也因为不间断燃烧，排放中一氧化碳和未充分燃烧的碳氢化合物含量相对较低。由于该发动机的气室和曲轴箱是密封的，所以无需润滑油。

斯特林发动机的燃烧方式决定其工作安静。在低温下起步快，因为燃烧室在发动机启动前首先被点燃。由于斯特林发动机内的总热能必须通过导热传输，因此出现一个非常迟缓且不稳定的表现，但当该发动机作为增程器时，这一个弱点不会对串联式混合动力汽车的性能造成任何影响。

优势：

- 1) 燃料选择范围广，任何燃料都可以作为热源；
- 2) 通过改进持续燃烧，其有害物质排量普遍偏低；
- 3) 在部分负荷状态下仍然保持高效率；
- 4) 转矩特性良好；
- 5) 持续燃烧使其噪声低；
- 6) 低温启动快。

劣势：

- 1) 必要的导热造成反应严重滞后；
- 2) 负荷控制困难；
- 3) 所占空间大导致功率密度有限。

4.1.6 燃气轮机

燃气轮机的特点在于转换后的能量绝大部分以动能形式作为流体能存在。一般来说，汽车用燃气轮机将不断通过过滤器和消声装置吸入的空气在离心式压缩机中进行压缩，然后在热交换器中进行加热。目前已知的汽车用燃气轮机使用的热交换器几乎都为旋转式回热器。经过压缩和预热的空气进入燃烧室，由燃料燃烧直接加热。压缩和加热后的气体中的动能将通过1~3个涡轮机传送到1~3个轴系。图4.5为双轴燃气轮机的原理图以及理想状态下的 $T-S$ 曲线。

同室燃烧的燃气轮机中气压和温度都相对较低，在一台换热器中充分利用排气所含热能导致成本增加。与柴油机相反，在部分负荷工况下，燃气轮机的压缩比下降。这种情况基本上是由有限的热效率造成的。

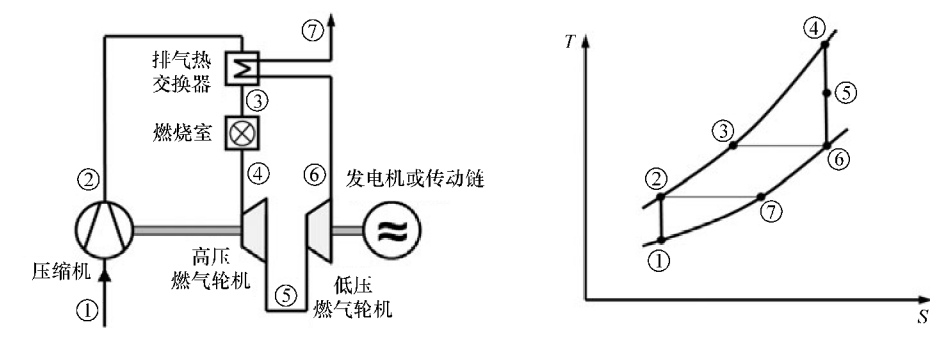


图 4.5 双轴燃气轮机和理想过程 ($T-S$ 图)

优势:

- 1) 功率密度大;
- 2) 大功率时反应速度快;
- 3) 可选择不同的燃料。

劣势:

- 1) 部分负荷时效率非常低;
- 2) 转速高。

4.1.7 燃料电池

燃料电池是一种创新的能量转换技术。燃料电池中的燃料，比如氢在空气中氧化还原，可直接产生电能。该原理与电池供电的电力驱动非常相似，但是燃料电池工作方式不可逆，因此不属于蓄能器，而是一个能量转换装置。燃料电池的研究在 20 世纪 50 年代已经取得突破，并应用于航空航天领域。

燃料电池在工作时向阳极（负极板）供给燃料（如氢气），向阴极（正极板）供给氧化物（如空气中的氧气）。两个电极与外部能耗装置（如电动机）相连，这样一来，氢分子

中分解出的电子通过电动机流向阴极,如图4.6所示。目前最有潜力的技术是在车辆上使用PEM燃料电池,即固体高分子电解质燃料电池。高分子隔膜是高分子材料做成的电解,具有良好的质子传导性能膜,且功率密度高、工作温度低于 100°C 。

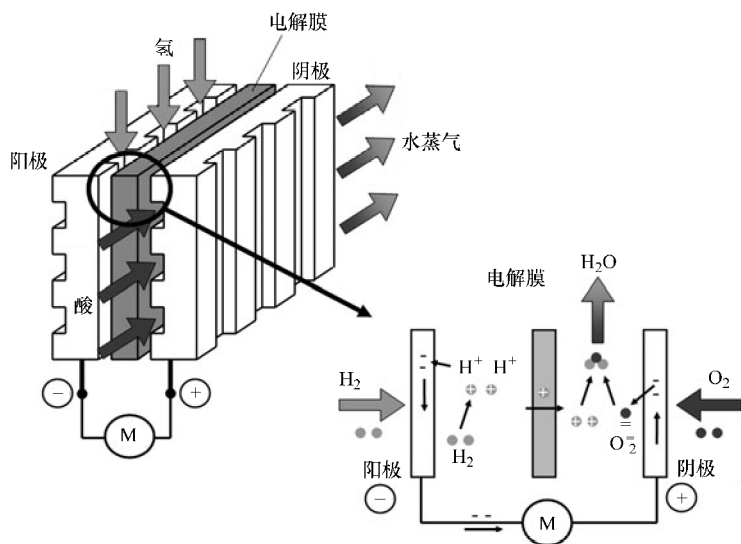


图 4.6 燃料电池的结构简图

在图4.7中,燃料电池系统简单划分为燃料电池组、燃料供应、冷却系统、供气和控制单元。由于燃料电池在功率低时效率最高,所以系统效率与负荷相对,处于负荷下限示例外,系统效率为50%。

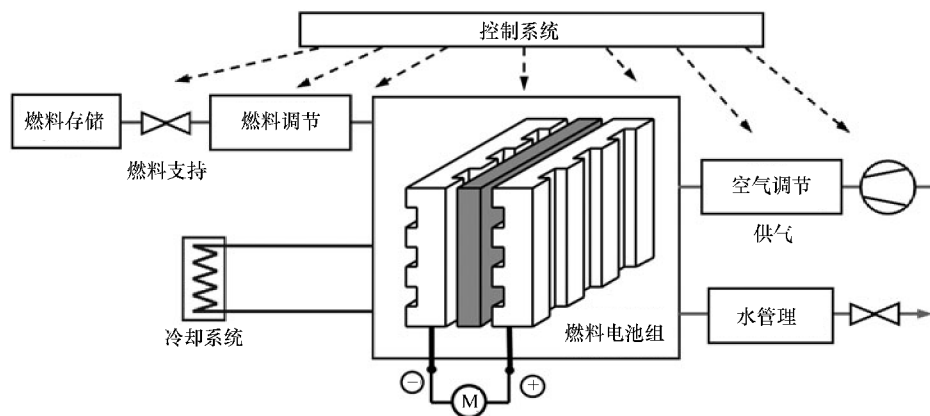


图 4.7 燃料电池系统的简化图示

在稳定运行和低功率时,燃料电池反应效率比燃烧的效率,将燃料电池作为增程器可以保持其稳定运行状态。燃料电池的效率,但是外形尺寸较大。

由于燃料电池产生电能,因此需要搭配电力驱动系统,该系统与电蓄能器结合,从形式上构成一个混合动力系统。由此出现纯燃料电池驱动的一系列附加功能,如制动能量回收、功

率叠加、车辆性能尤其是冷起动性能提升、负荷点提升，以提高燃料电池系统的效率。

氢气是当前最有效的燃料电池燃料，但是无论是在大批量生产还是运输方面，或是从环境友好为出发点，氢燃料电池都没拿出令人满意的解决方案。

既然燃料电池扮演改革者的角色，那么部分碳氢化合物也可以作为能源载体，从而在保证整体效率的前提下降低成本。以下物质作为能源载体可以考虑应用在汽车领域：

- 1) 氢气；
- 2) 天然气；
- 3) 液化气；
- 4) 甲醇（或称为直接甲醇燃料电池，而无需转化器）；
- 5) 乙二醇；
- 6) 二甲醚；
- 7) 柴油；
- 8) 改良汽油。

优势：

- 1) 无直接整体污染物排放；
- 2) 使用可再生的氢作为燃料，二氧化碳零排放；
- 3) 无噪声；
- 4) 无运动部件；
- 5) 部分负荷时效率良好。

劣势：

- 1) 使用贵金属催化剂如铂，导致采购成本高；
- 2) 氢气的储存和燃料补给昂贵；
- 3) 不稳定工况导致使用寿命缩短；
- 4) 功率质量比不佳；
- 5) 满负荷时效率低；
- 6) 冬季使用受条件限制；
- 7) 体积大。

4.2 电机

电机是任何电力驱动不可缺少的组成部分，它将电能转换为机械能用于驱动机械和汽车。反过来，通过发动机驱动，电机也可以作为发电机使用。

操控电机需要适合的功率电子装置和相关电子控制元件。图 4.8 是汽车电驱动装置的原理。跟工业和火车电驱动装置相比，汽车的电驱动装置无需接入电网，而是由直流电源提供，如电池或燃料电池。电机提供动能，通常通过一台变速器与轴速度保持一致。

电机分为固定和旋转两个部分。固定的部分称为定子，用于电功率输入和输出。旋转的部分称为转子，用于输入和输出机械功率。电能转换在空气间隙中完成。定子和转子在工作

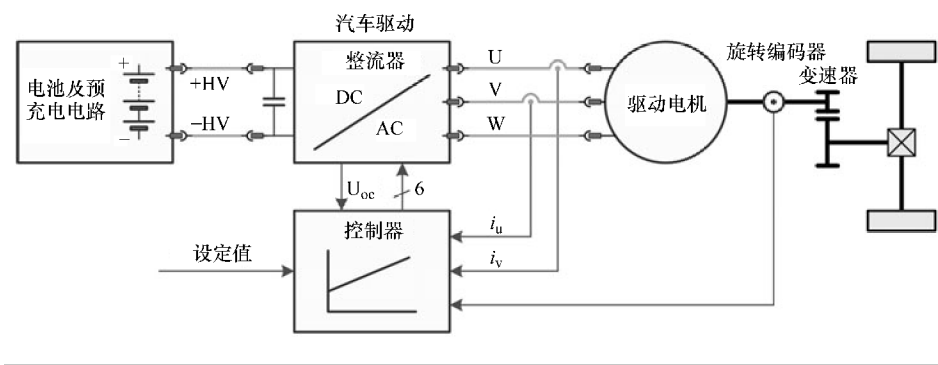


图 4.8 汽车电力驱动的构造原理

中都会造成能量损失。
车辆上驱动系统中，电机的功率在 3 ~ 300kW。实践证明电机用于驱动动力强劲、性能优异，且效率高。图 4.9 为各种电机的基本区别。

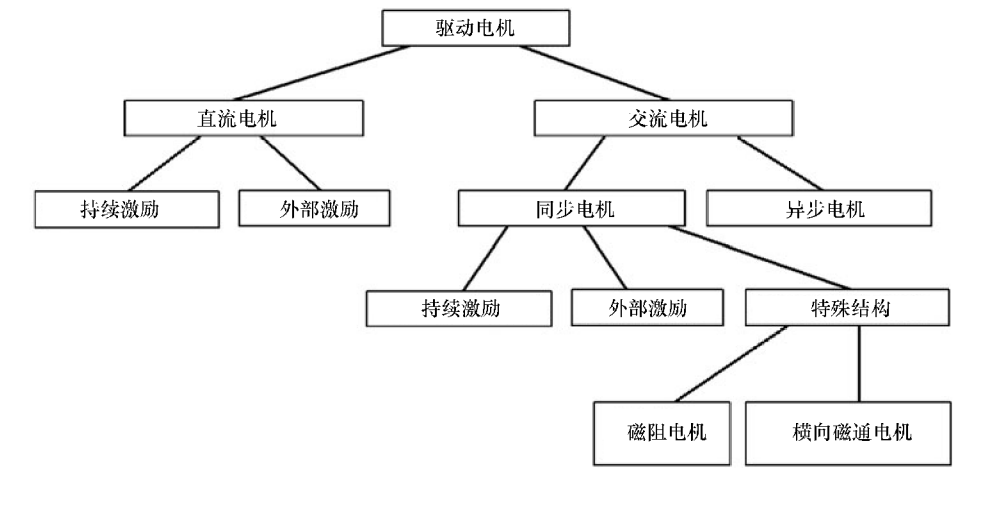


图 4.9 驱动电机的分类

4.2.1 工作界限和特性曲线

工作界限

电机的特性在于其工作范围介于两个不同的工作界限之间。首先有所谓的额定尺寸、额定转矩 M_N 和额定功率 P_N ，这些值跟电机的热负荷和机械负荷无关。除此之外还有所谓的过载范围，这一范围内电机可以在短时间高负荷运转。在过载范围内最大转矩为 M_{max} ，最大功率为 P_{max} ，这些最大值只允许短时间出现。最大值出现的时间由绕组温度、组件承受负荷的机械强度以及对电机寿命的影响决定。如果电机长期在过载范围内工作或者经常瞬间过载，形成的强电流会导致电机过热。绝缘绕组的绝缘等级在此起到决定性作用。为了防止电机过载，绕组端部（最热处）的温度经过测量并传送到电子控制装置上。通过在线温度

模型可以得出电机状态并进行预测，或在必要时调低电机的功率。

某些情况下，负荷过大可能迅速达到电机的热极限值，导致电机寿命下降。转速过快可能直接造成机械损坏，导致机械故障。此处指的是离心力过大使转子被抛出，也就是说，转子的组成部分松脱，可能破坏整个电机。

在混合动力车辆上，电机不需要一直在最大电负荷情况下运转，其过载能力呈现出各种结构方面的可能性，所以尺寸略小的电机也可以达到平均的负荷要求，且峰值功率时，如加速过程或增压发动机克服增压压力形成过程（起步滞后 - 涡轮迟滞）可通过电机的过载能力进行弥补。优势在于，重量、空间要求和成本均有优势，低负荷时的效率更高。因此，根据电机的位置和尺寸，其过载能力在 1~2.5 倍之间，也就是说电机可承受的短时负荷为额定负荷的 2.5 倍。

特性

发动机和电机的特性曲线完全不同。发动机在空转速度时仍可输出转矩，而电机的工作转速范围可低至 0，这样一来在车辆静止时仍可以输出最大转矩。如果可以控制转矩，那么转矩可以为正也可以为负，即电动机和发电机可以两个方向操作（四象限运行），如图 4.10 所示。该特性曲线图适用于一个给定的电源电压和某个指定过载时间。必要的控制将在“第 4.3 节：功率电子装置”中阐明。

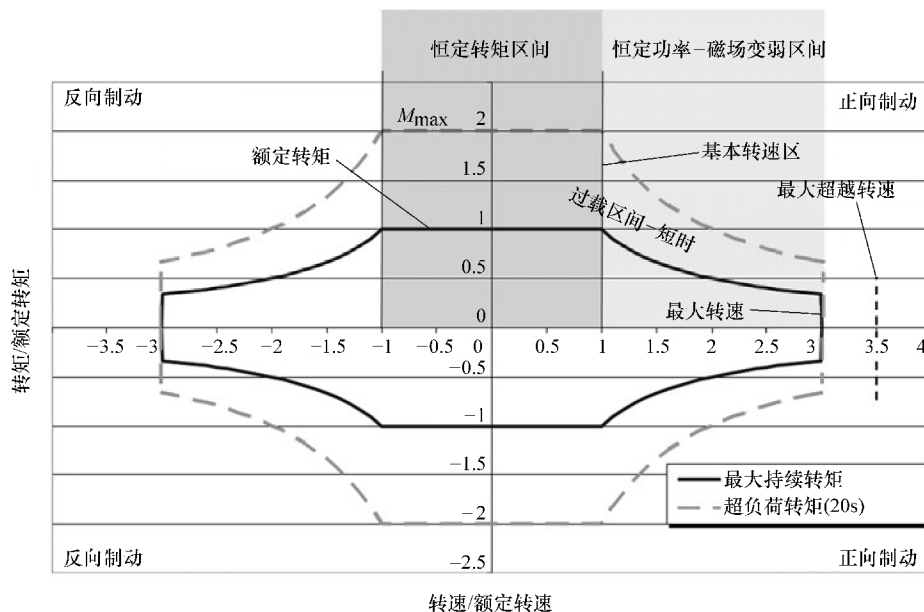


图 4.10 电机的理想 M/n 运行曲线

在从静止状态到达到基础转速的基本转速范围内，可以调节额定转矩 M_N 及最大转矩 M_{Nmax} 。在该范围内，由于转速增加而转矩 M_N 恒定不变，机械功率线性递增，直至达到额定功率，如图 4.11 所示。该图所指转速为基础转速，用 n_G 表示，如式（4-1）：

$$n_G = \frac{P_N}{2\pi M_N} \quad (4-1)$$

式中 n_G ——基础转速 (rad/s);

P_N ——额定功率 (W);

M_N ——额定转矩 (N·m)。

基础转速以下时, 电流与转矩成正比, 电压和转速成正比。当达到最大电压时, 电机中的磁通必须降低, 以保证电压恒定。因此这一范围也称为弱磁范围。

磁场减弱导致了转矩减小。如果这时是成反比的旋转速度, 得出一个恒定功率。

因此, 根据式 (4-2) 弱磁范围中最大转矩得出:

$$M = \frac{P_N}{2\pi n} \text{ mit } P_N = \text{常数} \quad (4-2)$$

式中 M ——弱磁范围中持续最大转矩 (N·m);

P_N ——额定功率 (W);

n ——转速 (rad/s)。

相对于发动机, 电机可以在车辆从静止状态起动时输出转矩。因此在带有电机的传动链上无需离合器 (起步离合)。电机的转矩特性基本与车辆驱动轮所需的转矩相对应, 如图 4.12 所示。对于安装发动机的车辆, 作用于驱动轮的牵引力必需根据相应的功率和车辆行驶速度通过换挡来设定, 而电机的转矩特性更接近于理想转矩需求。因此, 一般情况下, 电驱动装置可以取代手动变速器, 可以根据需要增加一个变速机构, 用于调节电机的转速范

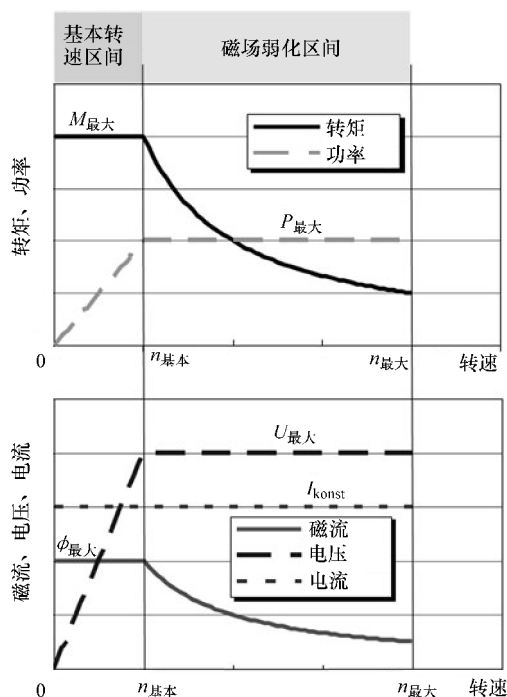


图 4.11 电机的理想电气和机械值

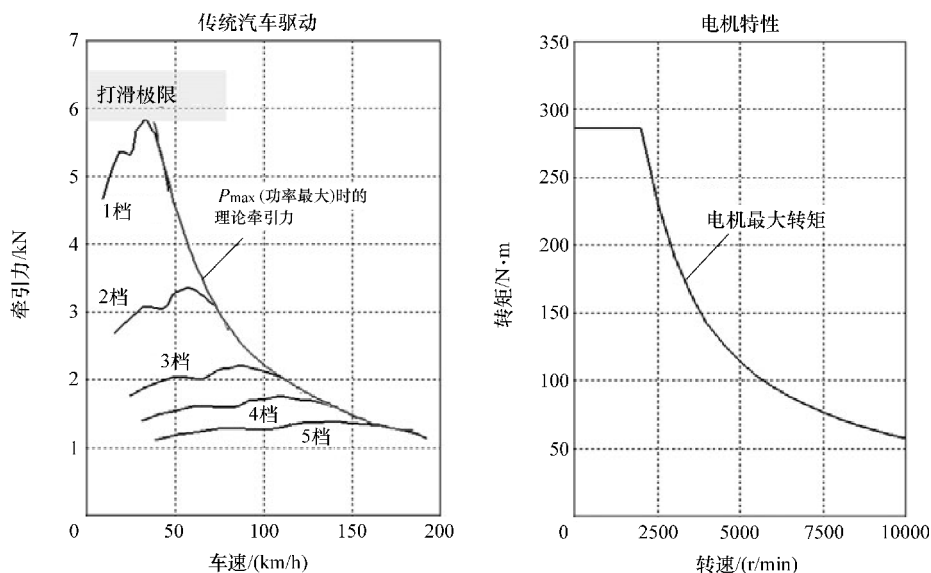


图 4.12 比较配备发动机和 5 档手动变速器的常规汽车与电机驱动车辆的最大牵引力

围。有时候,根据转速范围的大小采用高效率的2级变速器,如雷克萨斯GS450h和LS600h,参见本书第6章。

4.2.2 直流电机

目前,用于牵引的直流电机(GM)应用范围较窄,只应用于铲车或者为混合动力应用提供一定起动功率的以及简单的电动汽车。这里对直流电机进行详细阐述,是因为掌握其工作原理有助于更好地了解电机的工作方式。

定子的组成部分通常有:薄钢板制成的壳体、内部的主磁极(既可以作为永磁体也可作为电磁铁)及励磁绕组,以及换向器。带电枢绕组的鼓形转子在两极之间转动。电枢绕组是由多个线圈构成,通常置于转子铁片的槽内,其端部连接集流器。电刷固定在集电环上,电枢绕组通过电刷导入电枢电流。

工作原理

励磁绕组通过激励作用,直流电机形成一个磁场。当电流流过磁场中的电枢绕组,形成一个力或力矩,带动转子旋转,如图4.13所示。由电刷和集流器构成的换向器确保旋转的电枢绕组分配电流,生成尽可能大的转矩。固定的主磁极内旋转的电枢使磁通量产生周期性变化,换向器相应地将流入直流电机电枢绕组的交流电转换成直流电。

层叠铁心(绝缘铁片)组成的电枢铁心维持低涡流损耗。

直流电机根据电路连接进行分类。每一个电枢绕组和励磁绕组都连接到一个固定电压的直流电机,称为“外激励直流电机”,如图4.14所示。在大多数情况下,电枢绕组与励磁绕组(磁场绕组)并联,且连接同一电源。该类电机被称为“并励电机”。“串励电机”的电枢绕组和励磁绕组串联,电流流经电枢绕组和励磁绕组。

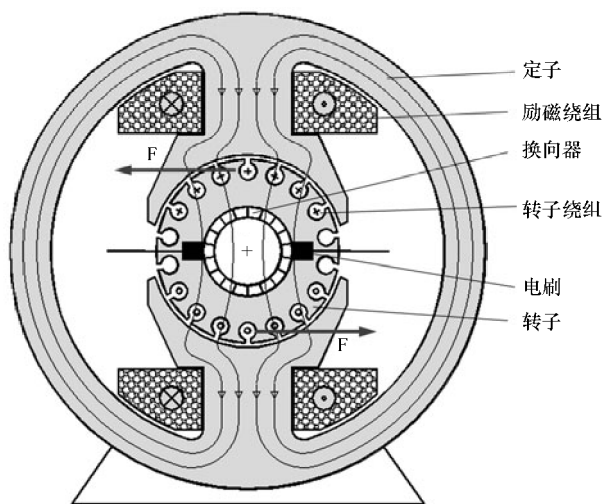


图 4.13 直流电机的原理图

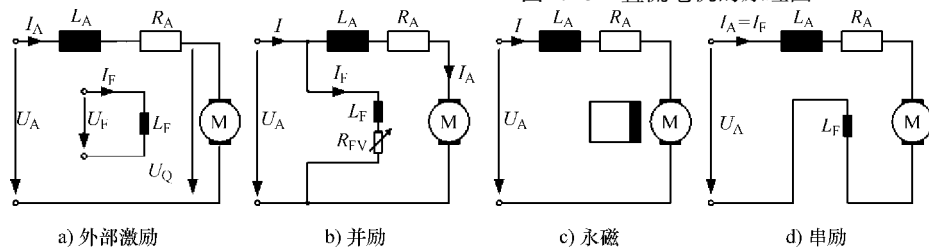


图 4.14 直流电机简图

换向器使直流电机有一些弱点。一方面,电刷的使用增加了电机的维护成本,另一方面

使得直流电机比相同的交流电机重且生产周期长。换向器导致直流电机最高转速受限。无刷直流电机可以作为替代方案。其结构是转子为永磁体构成，而绕组在定子内（如永磁同步电机 PSM，参见章节 4.2.6）。由于转子无绕组，所以也无需电刷。然而，电子换向是必需的，而带传感器控制和无传感器控制的无刷直流电机工作原理有所区别。

由于生产成本低、维护费用贵且效率不及交流电机，直流电机不再被考虑作为车辆牵引电机。

4.2.3 交流电机

交流电机的结构和工作原理以产生三相交流电的旋转电磁场为基础。旋转磁场绕组位于定子内。同步和异步感应电机的定子机构上基本一致，两类电机定子都是由层叠铁心和三相绕组构成。三相绕组的绕组相旋转对称分配。三相电网的交流电压相互间有 120° 相位差（ $1/3$ 个周期），为三相绕组不断供电。

通过产生的旋转磁场，带动转子。式（4-3）表示旋转磁场的旋转频率 f_1 与机械同步转速 n_s 的关系：

$$n_1 = n_s = \frac{f_1}{p} \quad (4-3)$$

式中 n_1 、 n_s —— f_1 频率下的同步转速（rad/s）；

f_1 ——交流电频率（ s^{-1} ）；

p ——极对数。

同步和异步交流电机的区别仅在于转子的结构，如图 4.15 所示。

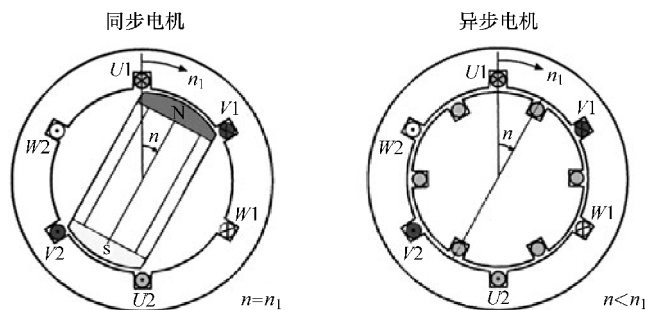


图 4.15 同步和异步电机的结构比较

同步交流电机的转子带电场或永磁激励，与定子的旋转磁场同步；而异步交流电机的转子带短路绕组。只要转子转速偏离同步转速，定子的旋转磁场会在转子绕组中感应产生电流，由此形成转矩。转子转速与同步转速之间的偏差就是所谓的转差率，见式（4-4）。

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (4-4)$$

式中 s ——转差率；

n_1 —— f_1 频率下的同步转速（rad/s）；

n ——转子转速（rad/s）。

4.2.4 异步电机

异步电机的特点是转子带短路绕组。

多数情况下钢制转子带棒形绕组，这些棒形绕组通过两个短路环相互连接（笼型转子），如图 4.16 所示。

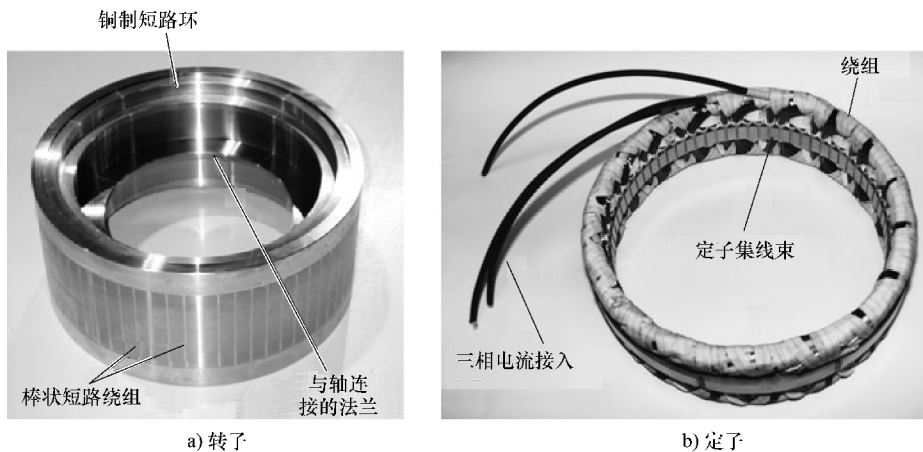


图 4.16 异步电机的转子和定子

转矩输出需要一个转差率。为了能提供所需的动力，随着负荷增加，在转速降低的同时转差率和转矩输出增大。极限转矩达到失步转矩。由于旋转磁场和转子之间有转速差，漏电抗增加使转矩减小，如图 4.17 所示。图中展示出不同恒定输入频率（ $f_1 - f_5$ ）下，转矩和转速变化的特征。

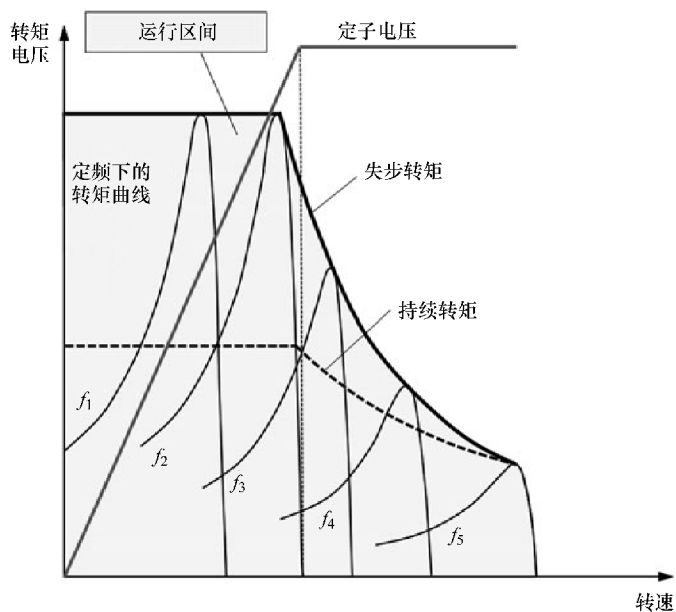


图 4.17 变压和变频下的异步电机理想运行曲线

可以通过改变定子转速、极对数或转差率改变电机转速。当异步电机作为驱动装置时，定子磁场的频率发生变化，如图 4.17 所示。为了保持恒定的转矩极限，不仅需要保持频率的稳定，还需要保持定子电压和频率的比值恒定。当定子磁场达到弱磁范围，定子电压稳定，这样的情况下失步转矩出现的可能性降低。定子磁场中可变的频率和电压由整流器调节，其可以将所有工作点调整到转矩转速极限值以内。

4.2.5 同步电机

如图 4.18 所示，同步电机的定子与异步电机的定子结构相似。转子可使用永磁体（永磁同步电机）或通过直流磁极转子进行磁化（外部励磁同步电机）。这种情况下，转子由带绕组的凸极构成。转子中的激励绕组通过滑环并通过直流变压器（DC/DC 转换器），参见本书章节 4.3。磁极转子可为实心钢铸，其原因是保持磁流在时间上恒定。虽然同步电机的构成可以无需磁性材料，但目前辅助电力电子装置用于励磁电流和向转子传输励磁电流正处在预开发阶段，其目的是使这类直流电机在电动牵引范围内稳定地工作。

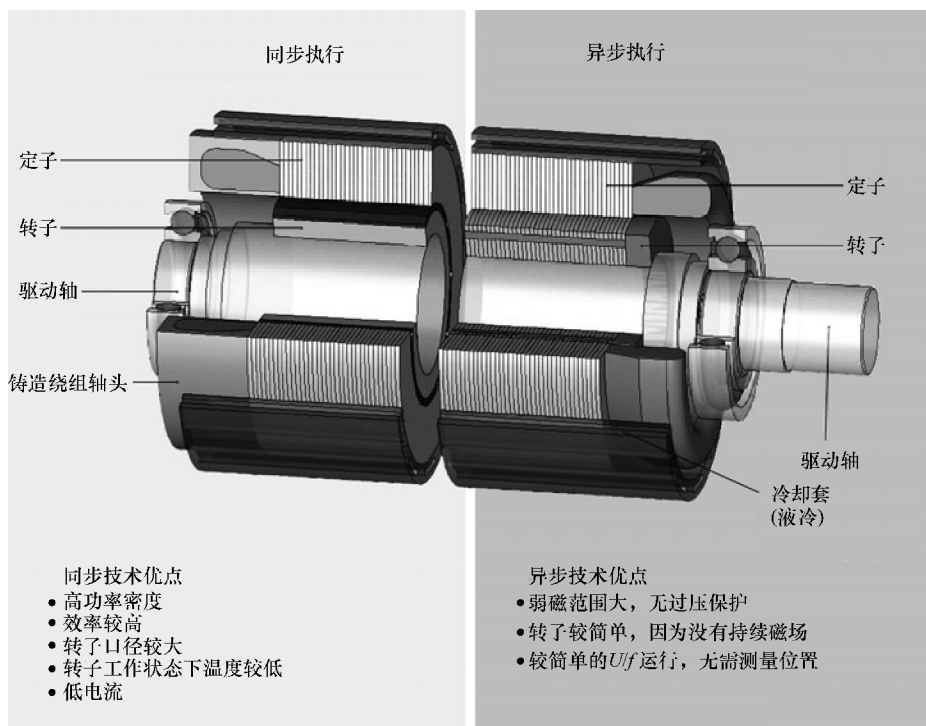


图 4.18 同步和异步电机结构比较

同步电机体积小、效率高，与直流电机、异步电机以及磁阻电机相比，其重量最轻。

4.2.6 永磁同步电机

如上所述，永磁同步电机是一种同步电机，且是目前最常见的应用于混合动力汽车的电机。由于采用永磁体构成励磁场，该电机作为驱动装置的选择之一在部分负荷的情况下也能达到高效率。采用高能量密度的稀土永磁材料或 Nd - Fe - B 永磁材料可以生产出体积相当

小的永磁同步电机，因此永磁同步电机的成本就会高于异步电机。此外，安装转子和定子需要特殊的技术，才能产生巨大的磁力。该类电机凭借其高效的优势在电车和混合动力汽车的各种驱动技术中越来越受欢迎。对于新型发动机，更侧重于其电力电子装置、电机、变速器的系统协调性，从而在重量、功率密度和效率三个方面达到最佳结合效果。

结构

永磁同步电机与异步电机的定子结构相似。图 4.19 所示为可能出现的转子中永磁体的排列结构。

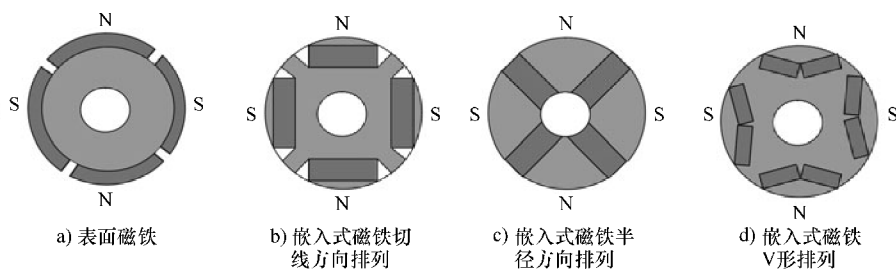


图 4.19 永磁同步电机上转子的基础结构

外转子永磁同步电机是一种结构特殊的永磁同步电机，如图 4.20 所示。该电机带 8 对或更多对极数，以满足低转速时高转矩密度和功率密度的要求。与内转子结构相比，外转子结构特别需要注意的是离心力造成磁体负荷，相对而言，外转子永磁同步电机由于其结构特点，其磁体位置固定。

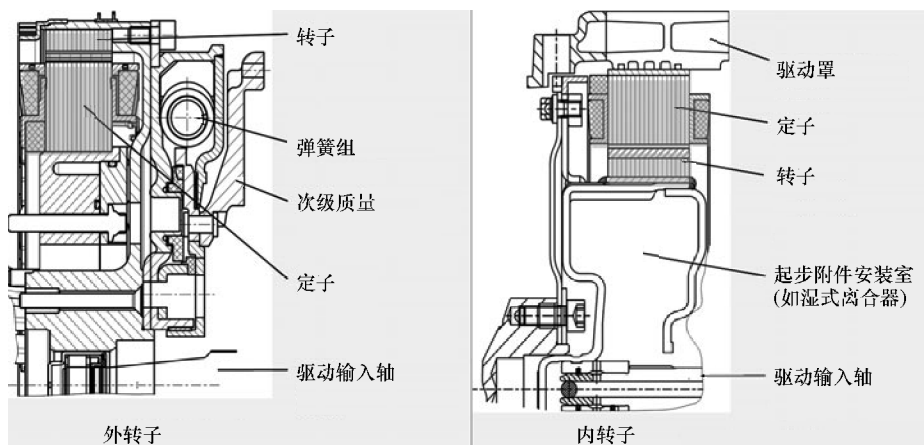


图 4.20 外转子和内转子结构的永磁同步电机对比图

内转子永磁同步电机的特点是定子外部需要大面积的水冷套，这一结构使电机负荷更重。相对而言，外转子永磁同步电机定子的热交换面积小，如图 4.20 所示。

凭借其效率高（可达 94%）、机械和电力结构简单（无电刷、无滑动接触、绕组简单）的优势，永磁同步电机通过电子换向非常适合应用在车辆驱动上。基于上述优点，轿车领域的汽车自动化应用几乎只使用这类电机。

4.2.7 开关磁阻电机

开关磁阻电机是一款特殊的同步电机，简称 SRM。该电机可以代替工业驱动设备、伺服驱动器以及车辆驱动装置。磁阻产生的力使磁场中的铁棒向磁阻小的方向移动。作为开关磁阻电机主要部件的定子和转子固定于卡槽内，且齿数为偶数。绕组只缠绕在定子上。这样一来，定子内生成磁极。转子上既无绕组又无短路笼环和永磁体。图 4.21 为带开关磁阻电机的驱动系统的基本结构，图 4.70 所示为该电机在飞轮蓄能系统中的应用。

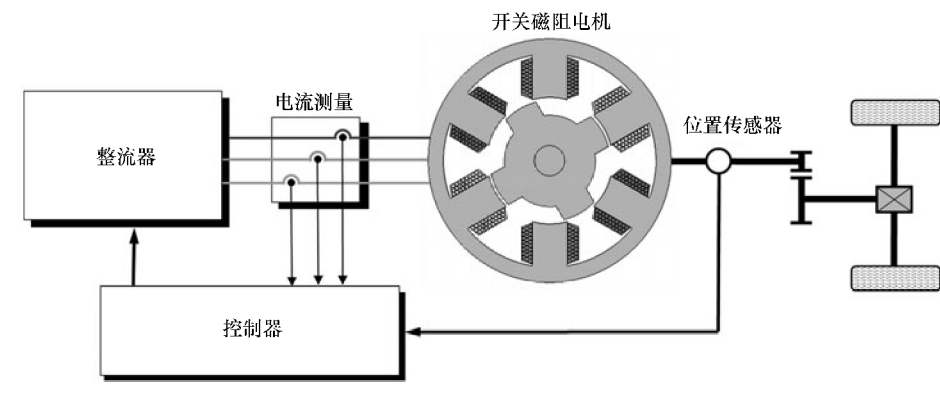


图 4.21 开关磁阻电机（带控制器）

SRM 的特点是定子与转子的齿数不同。定子和转子的齿比决定转子的旋转方向，也就是定子磁场的周期性方向旋转。定子磁动势在转换中，逐步增加了对磁极转子的位置依赖性，从而确保 SRM 的功能性。转子的位置通过磁极转子位置传感器传输给电力电子装置，从而保障操作的准确性。脉冲叠加形成 SRM 的总转矩。如果磁阻电机在低转速时需要非常均匀的转矩，必须使用多相绕组，也只有如此，才能保证在低转速的情况下产生足够的转矩。最常见的定子和转子的齿比配置是 16:12 或 24:18。

SRM 的优势在于单位功率高，成本低（无永磁体），基础转速时持续转矩稳定，极好的加速性能，动力强劲，惯性矩小，紧急运行特性良好。因为该电机无需永磁体，在关闭状态无磁损失（空转损失）。

开关磁阻电机的缺点在于，需要配备相位一致且成本较高的功率电子装置（控制方法复杂），弱磁范围内性能差，运行噪声大，最重要的一点是明显的转矩波动和法向力波动。

4.2.8 横向磁通永磁电机

横向磁通永磁电机与常规电机的区别在于对磁通的导向性。不同于常规的电机纵向磁通，该类电机的磁通方向为平行于移动方向。通过一个同轴环形线圈，该线圈的功能是将电流导向切线方向，且该线圈周围环绕着大量独立的磁路及轴向磁通，如图 4.22 所示。磁路在转子的转动方向横向闭合。由于磁路结构特殊且磁通导向相对于转子转动方向为横向，所以能将极距降至极小值，且不受电枢磁通限制，因此，该类电机具有特别高的功率密度。

转子磁轭上相反磁极的永磁体相间排列。定子磁轭位于另一侧的气隙，其切线方向与两

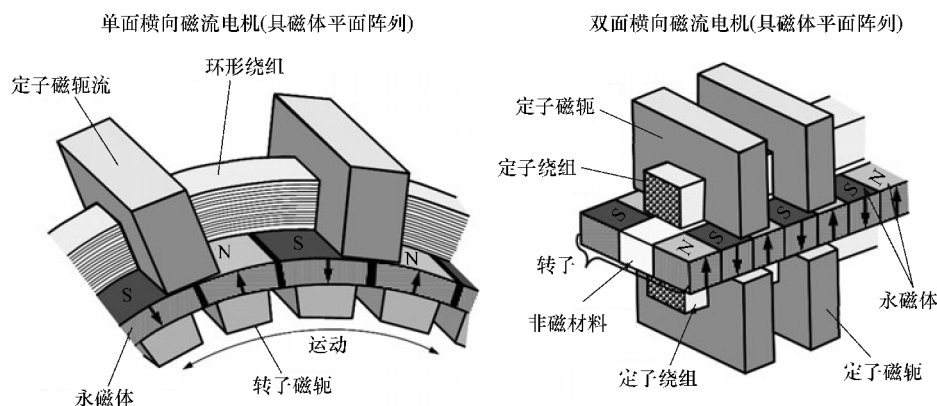


图 4.22 横向磁通电机的原理图

个极距之间有一定距离。转子磁轭中的磁通受两个因素影响：产生的磁通借助环形绕组跟电流强度相关，而电流与转子位置无关；磁通在所有定子磁轭中相等。永磁体形成恒定磁通。转子每绕极距转动一次，该磁通组成变换一次方向。所有磁轭磁通之和即为绕组交链磁通。

作为驱动装置，需要两个可以相互替换的动力系统。每个传动系统需要一个独立的定子/转子系统及配套整流器。最新设计的磁通方向与新型磁性材料相结合，横向磁场永磁电机驱动性能的优势体现在它比常规直流电机、异步电机和同步电机的功率密度高 3~5 倍。该电机的另一个优势是效率高，其原因在于：其一，无绕组端部降低铜损失；其二，实际运行中磁场和电场不存在空间冲突。

要注意的是，这样的系统（三维磁通应用）结构特别复杂，在应用中会增加额外费用。此外，横向磁通永磁电机的缺点还包括：其转矩不稳定、法向力波动以及所引起的不良影响，如噪声大。通过改进，横向磁通永磁电机凭借其高转矩密度和结构紧凑的优势将成为车辆驱动装置，首选是应用于轮毂驱动。

作为轮毂驱动，横向磁通永磁电机的定子固定在主动轴上，而转子与轮毂壳体相连。通过一个控制装置使线圈通电受转子位置影响。该驱动装置经过电子控制可以平稳地从电动模式切换到发电模式。

结构

横向磁通永磁电机可分单面和双面结构。图 4.23 为径向截面示意图，图 4.24 为双面结构示意图，该示意图中转子（1、2）位于内定子（5、6）和外定子（4）之间（带磁通集中式极靴的结构）。两个气隙有助于力的产生，同时使磁性材料（2）尽可能得到充分利用。该电机的机械结构复杂，其原因在于磁体只能从边缘固定，且在安装过程中不可能将转子插入两个定子之间。此外，无法将两相以上的绕组缠绕在一个转子上。绕组既可置于内定子或外定子上，也可同时置于两个定子上。

图 4.25 所示为单面结构的横向磁通永磁电机。该结构中只有一个定子，虽然利用率减半，但机械构造非常简单，且相数不受限制。每一束永磁体按一定距离并列固定在转子上，且磁体间两极相对（磁体平面阵列）。因为能够使用标准的逆变器，出现一种三相结构（1、

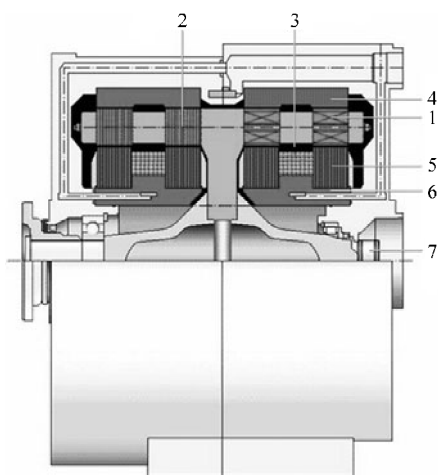


图 4.23 Voith Turbo 给巴士开发的 ELVO - Drive 系统的横向磁通永磁电机

1—永磁体 2—冲压片组（转子） 3—绕组 4—软铁材料
5—冲压片组 6—软铁磁轭 7—分解器

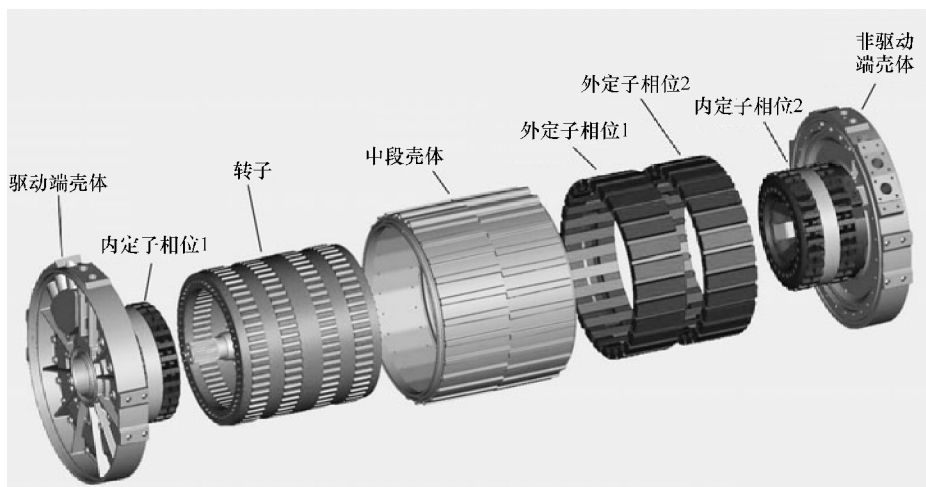


图 4.24 Voith Turbo 公司的双面横向磁通永磁电机

2、3) 的横向磁通永磁电机。

4.2.9 电机比较

比较不同的电机必须始终考虑到相应的电力电子装置。电力电子装置的最大效率达 93% ~ 99%。一个驱动系统能否达到最大效率主要取决于所用的电机类型。驱动过程需覆盖完整的工作范围。对于驱动装置的布局，需要相应的循环来评估。不同类型的电机通过不同的转速/转矩范围达到最大效率。

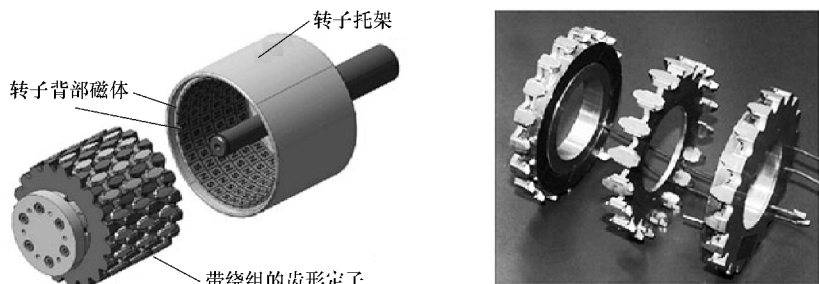


图 4.25 Compact Dynamics 公司的单面横向磁通永磁电机（磁体平面阵列）

表 4.1 的评估矩阵列出了 5 类电机。除了质量评估以外，表 4.2 中包含了 6 组被评估的电机的主要技术参数。

表 4.1 电机的评价矩阵

性能	直流电机	同步电机		异步电机	横流磁通电机	开关磁阻电机
		外界激励	持续激励			
功率密度	—	0	++	+	+	+
效率	—	+	++	0	+	+
可控性	++	+	+	0	+	+
噪声	-		++	+		—
热过载能力	—	+	0	++		++
价格	—	—	—	+	—	++
系统成本	+	0	0	++	—	+
技术水平	++	—	++	++	—	0
安全性	—	++	—	++	+	++

表 4.2 电机的主要功率参数

功率参数	直流电机	同步电机	同步电机	异步电机	横磁通电机	开关磁阻电机
		外界激励	持续激励			
最高转速/(r/min)	7000	>10 000	>10 000	>10 000	>10 000	>10 000
弱磁表现	3	3~7	3	3~7	—	2
单位持续转矩/N·m	0.7	0.6~0.75	0.95~1.72	0.6~0.8	—	0.8~1.1
单位持续功率/kW	0.15~0.25	0.15~0.25	0.3~0.95	0.2~0.55	—	0.2~0.62
电动机最大效率	0.82~0.88	0.87~0.92	0.87~0.94	0.89~0.93	0.96	0.9~0.94
控制器最大效率	0.89~0.99	0.93~0.98	0.93~0.98	0.93~0.98	0.93~0.97	0.93~0.97
驱动系统最大效率	0.8~0.85	0.81~0.9	0.81~0.92	0.83~0.91	—	0.83~0.91

几乎所有的交流电机（包括同步和异步两种结构）效率较高。永磁同步电机效率最高，

但其所采用的永磁体成本较高。目前市场上的大部分混合动力汽车使用该类电机。

其他特殊结构如横向磁通永磁电机或开关磁阻电机还处于积极的开发过程中。永磁体的使用将大大减少甚至完全放弃使用永磁体。在电驱动轴的工作过程中,在出现故障的情况下只允许没有或只有非常小的转矩值——“安全状态”。此外,不允许出现未经许可增加的电压值。这一点使永磁同步电机具有次优布局优势。外部励磁电机的电场可以从外部切断。该电机的弱点在于输入转子的励磁功率需要通过滑环或感应器传递。

4.2.10 实施方案

根据混合动力系统传动链的不同基本结构,电动机的集成可以采用不同的方式。首先是传动带式起动机/发电机单元,然后是曲轴一起动机—电机及其变速器集成,直到轮毂电动机。

增加牵引力的串联或并联混合动力驱动技术需要一台纯电动装置作用于至少一根轴上。

图 4.26 所示不同实施方案可以据此进行区分。

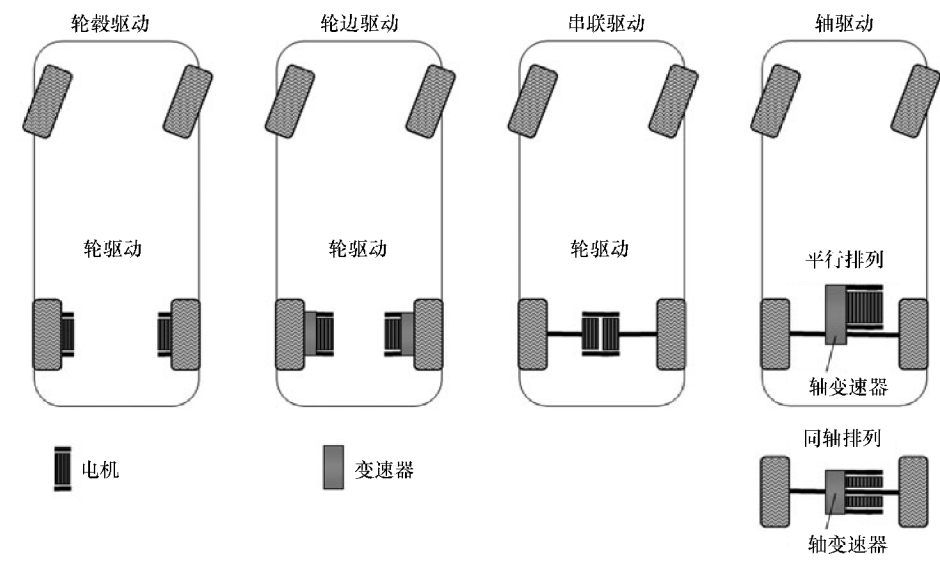


图 4.26 电驱动的不同结构

轮毂驱动装置是指电机置于轮辋中,整体性上具有优势。此外,也可以通过转矩矢量分配措施对车轮进行选择调节,从而使四驱系统相对简化。然而,从行驶动态学的角度来看,簧下质量显著上升是一个缺点。

图 4.27 所示为米其林公司开发的创新方案,并应用于主动轮胎。该车轮轮毂中不仅自带一台 30kW 驱动电机,还集成了制动盘和制动钳,以及主动机电控制式弹簧—减振单元和额外的机械式行驶弹簧。主动机电控制式弹簧—减振单元正好弥补簧下质量上升这一缺点。

在轮毂驱动方案中,变速器位于电机和车轮之间。因此电机可以高速转动,而且在保持功率不变的前提下,实现结构上更小、更轻便。然而,这样必然造成车辆生产成本增加。

两台电机位于同一轴上构成一个串联式驱动。转矩通过半轴传递。因此可以避免非悬架质量增加。带两台独立电机的混合驱动结构无需安装差速器,每个车轮还可以获得独立的转

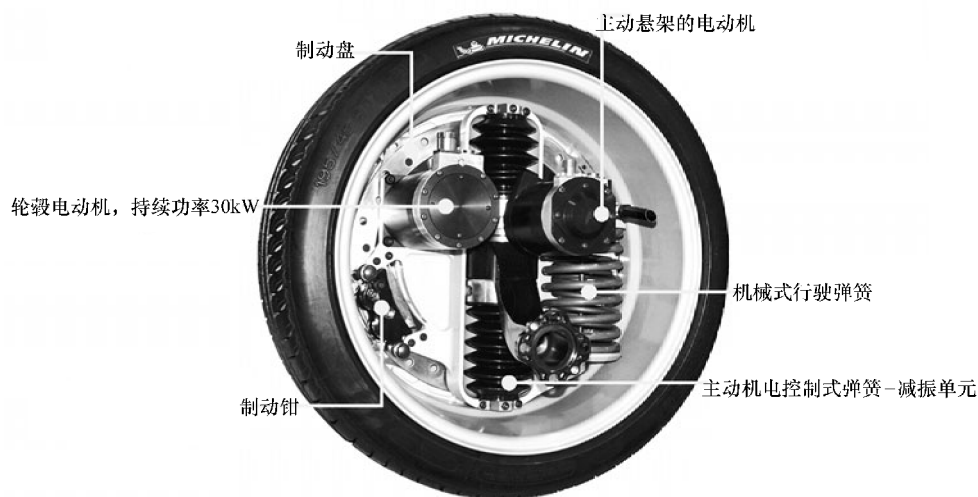


图 4.27 米其林主动车轮

矩。然而，该结构组合需要两台逆变器，这意味着成本增加。

带一台电机的混合动力结构组合较为经济，该电机通过机械差速器或行星齿轮装置控制主动轮。该系统既可在同轴上作为空心轴传动，也可应用于平行排列。

并联式混合动力技术中，电机通常安置在发动机和变速器之间，或与功率分流式混合动力技术一样，将电机集成在变速器内。接下来的章节将详细介绍混合动力汽车的变速器。由于目前混合动力变速器尚未普及，开发和生产成本成为新型混合动力技术一个非常重要的评判标准。成本作为技术发展的关键标准之一是需要尽可能将结构大小合适的混合动力变速器整合到车辆中。将一个整体混合动力模组集成到现有的变速器内，就可以通过尽可能少的改动实现从纯发动机汽车到混合动力汽车的转变，尤其是将额外的组件安装在现有的变速器的壳体内。

4.2.11 集成式变速器

曲轴 - 起动机 - 发电机

在并联混合动力汽车中，尤其是在中度混合动力技术中，电机通常安装在发动机和变速器之间。电机的转子在此代替双配重飞轮的初级配重。采用曲轴 - 起动机 - 发电机系统的有本田 Insight、奔驰 S400 混合动力或 AVL 涡轮增压混合动力，请参阅本书第 6 章。如果在发动机和电机之间安装一个分离离合器，发动机可以断开，从而实现没有发动机牵引力矩的纯电力驱动，请参阅本书第 7 章图 7.5 和图 7.6。此外，还可以直接将电机接至变速器中。混合动力汽车变速器的基本选择有中间轴式变速器、行星轮和无级变速器。

中间轴式变速器

虽然原则上所有中间轴式变速器都适用于并联式混合动力汽车，但为了使运行策略在换挡时达到最佳效果，混合动力汽车几乎都使用自动变速器，例如 ASG（手自一体）变速器和双离合变速器。

ASG 手自一体变速器的**优点**：

- 1) 自动换挡；
- 2) 旋转损失低，效率高；
- 3) 无液压泵；
- 4) 质量轻于自动行星轮变速器和双离合变速器；
- 5) 在欧洲，ASG（手自一体）变速器的造价低于行星轮变速器；
- 6) 可实现快速换挡；
- 7) 档位的变速比非常灵活；
- 8) 换挡感觉明显；
- 9) 可实现最低油耗。

ASG（手自一体）变速器同时也有以下**缺点**，但是电机的应用可以弥补部分缺点：

- (1) 牵引力中断；
- (2) 可能需要采用双配重飞轮减振，造成成本增加；
- (3) 没有控制器或空档间隔，不可能实现偶数 - 偶数或奇数 - 奇数换挡。

采埃孚公司 e-Tronic 混合驱动变速系统采用 ASG（手自一体）变速器，参见第 7 章的图 7.5。

双离合变速器（DKG）如同两个自动变速装置，其中一个负责双数档另一个负责奇数档。因此采用双离合变速器不会出现牵引力中断。

优点：

- 1) 全自动换挡，无牵引力中断；
- 2) 换挡质量良好；
- 3) 旋转损失低；
- 4) 可实现快速换挡；
- 5) 某些档位变速比较为灵活；
- 6) 换挡感觉明显。

缺点：

- 1) 动力总成的阻尼特性与 ASG（手自一体）变速器相似；
- 2) 可能需要采用双配重飞轮，造成成本增加；
- 3) 比 ASG（手自一体）变速器和行星轮变速器成本高；
- 4) 没有控制器或空档间隔不可能实现偶数 - 奇数或偶数 - 奇数换挡；
- 5) 可能需要换油。

德国 LuK 公司特别为混合动力技术改良了一款现有的双离合变速器。电机与变速器轴线平行排列。该变速器为双轴 - 双离合变速器结合干式双离合和机电执行器。奇数分度机构的变速器输入轴控制 1、3、5 档和倒档，偶数分度机构控制 2 档和 4 档。电机与变速器输入轴的偶数档位相连。通过第四档固定齿轮的一个中间齿轮进行驱动。电机正下方安装一台空

调压缩机, 该空调压缩机由 V 带进行驱动。无论车辆在制动能回收还是静止状态下, 该组合都能保证空调可以正常使用。将这部分组件整合在常规汽车驱动系统中, 虽然原有组件被新组件替换, 但样车的整体重量还是增加了 44kg。图 4.28 所示为该驱动装置线路图。

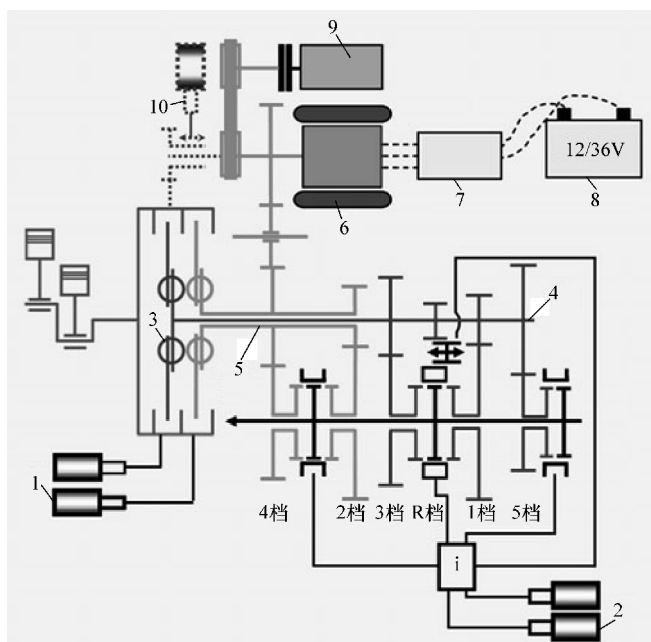


图 4.28 双离合混合驱动的构造图

1—离合执行器 2—变速器执行器 3—双离合 4—传动轴 1 5—传动轴 2 6—电机
7—功率电子元件 8—蓄能器 9—空调压缩机 10—冷起动装置

该技术具有所有混合动力驱动的功能, 且无需添加额外的组件, 也无需分离离合器。此外, 基础驱动系统的轴向长度保持不变, 如图 4.29 所示。原则上该驱动技术不会被限制在一定的电功率范围内。此处, 电机只是在转矩不足时通过变速比作用于变速器输入轴。

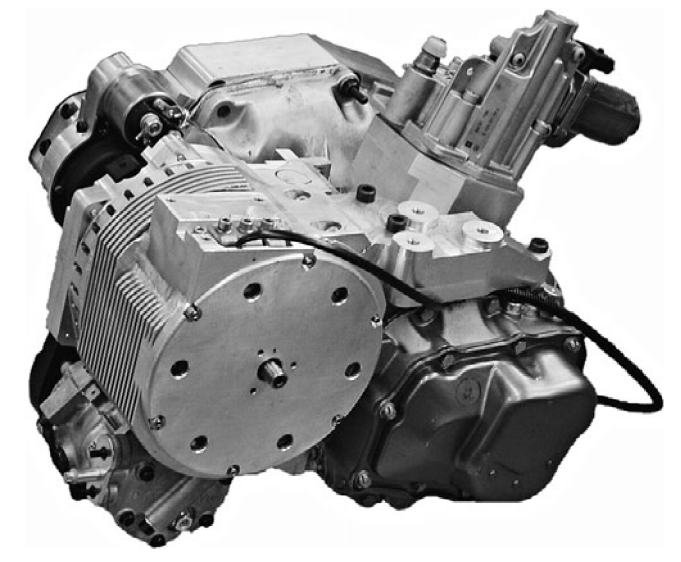


图 4.29 LuK 公司的双离合混合动力驱动

自动变速器

带行星轮机构的自动变速器（AT）是发展混合动力汽车进行的又一种改良。由于该变速器自动完成换档过程，所以更适用于混合动力汽车领域。其次，它在美国混合动力汽车市场上被广泛应用。该变速器摒弃了变矩器，极大降低了传动链以及行星轮机构的动力损失。优点如下：

- (1) 全自动换档无牵引力中断；
- (2) 良好的换档质量；
- (3) 出色的起步特性；
- (4) 可跳级换档；
- (5) 传动链具有良好的减振特性；
- (6) 拖挂牵引力大。

缺点：

- (1) 液压系统造成油耗高于 ASG 和 DKG 变速器；
- (2) 成本高于 ASG 变速器；
- (3) 某些结构上变速比灵活性不足。

以采埃孚公司 8 速混合动力自动变速器为例，采埃孚萨克斯将 8 速自动变速器作为基本变速器，将电机集成到现有的动力总成中，并安装混合动力模块。此处应用到一个模块设计原理，使其可以应用于从微型到全混合动力的任何系统中。图 4.30 所示为采埃孚萨克斯 8 速混合动力自动变速器在全混合动力中的应用。位于 K0 处双配重飞轮、电机和电子油泵集成在变速器壳体中，代替变矩器。

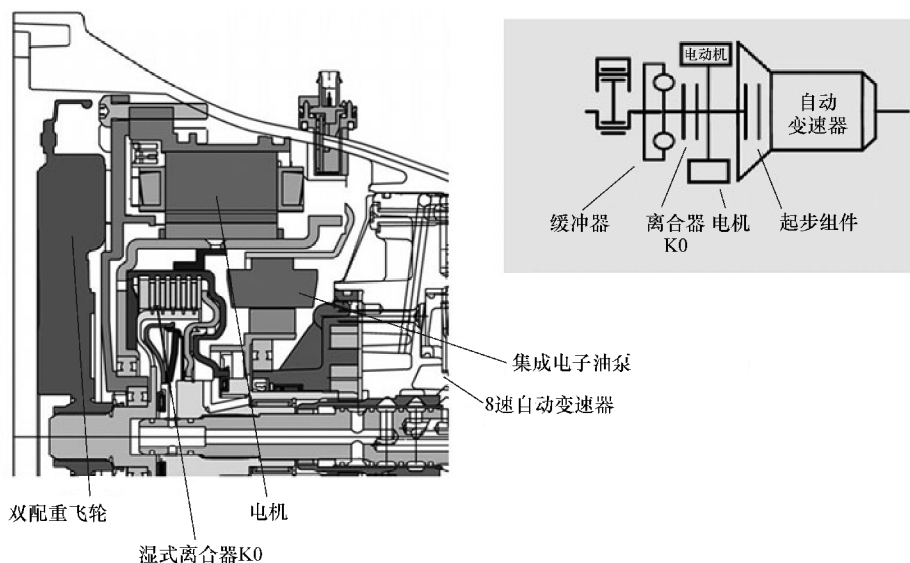


图 4.30 采埃孚萨克斯 8 速混合动力自动变速器

通过断开湿式离合器 K0，可以在发动机和电机之间去耦，从而实现电驱动。因此该离合器可以安装在电机内，且具有一个较小的径向高度。此外还集成了一台多磁极或多磁体的

永磁同步电机。

其他安装混合动力自动变速器的例子有奔驰 S400 混合动力汽车（参阅章节 6.6）以及大众途锐混合动力汽车（参见章节 6.10）。

无级变速器

无级变速器有 CVT 和功率分配式变速器，如双模式混合动力变速器。在串联式混合动力中 EVT 变速器也可以作为无级变速器，其原理是通过电路实现发动机转速和车轮转速之间的转换从而实现无级变速。

CVT 的优势在于可以选择变速比，从而在齿轮传动的功率要求中选择最佳的负荷点。CVT 本身成本高，因为 CVT 必须配备高压液压系统，成本又一次增加，效率还不理想。

CVT 适用于不同的混合动力构架。例如，将电机安装在发动机和变速器之间，但使用起/停功能可以保证变速器随时准备运行。即使是在发动机不工作的状态下，离合器和变速器仍然需要供油，这就体现出电动辅助泵的必要性。一种备受关注的方案是双区间 CVT，也被称为 i^2 无级变速器。该变速器可以被双重利用，也就是说同时通过相关传动轴系统和离合器系统，从而实现一个整体的变速比扩展，即变速器本身扩展范围的平方值（ i^2 无级变速器）。在轿车范围内，这一扩展范围很难得到充分利用，而且该变速器成本较高，所以一款简化版 i^2 无级变速器，即所谓的 $i\sqrt{i}$ 无级变速器诞生。 $i\sqrt{i}$ 无级变速器同样具备 CVT 链式传动转换器，而且跟 i^2 无级变速器一样通过换档双重利用链式传动转换器的调节范围。换档通过两个同步齿式离合器完成。一个 CVT 齿式离合器的扩展变速比为 5.78，通过换档可使整个变速器的变速比调节范围达到 14.22。图 4.31 所示为在混合动力应用中 $i\sqrt{i}$ 无级变速器在低速范围（ V_1 ）和高速范围（ V_2 ）的传动示意图。

发动机通过离合器 LK 与传动轴 W1 耦合，同时电机与链式传动转换器上的传动轴 W2 耦合。在 V_1 范围内，齿式离合器 K1 闭合，K2 打开。此时，电机驱动传动轴 W2 和 CVT，从而带动传动轴 W1，由此实现变速比连续变化。在低速范围内，电机既可以保证车辆平稳起步，又可以在减速过程中回收制动能，而发动机在 V_1 范围内通常不工作。随着驾驶人的换档，发动机在车辆达到一定速度后开始工作，而不使牵引力中断的换档在 V_2 范围内实现。在 V_2 范围内，如图 4.31b 所示，齿式离合器 K2 闭合，K1 打开。从而使电机以固定的变速比 i_{23} 与输出轴耦合。此时，发动机驱动传动轴 W1，通过 CVT 带动 W2，使其传动比连续变化。因此，在 V_2 模式下，发动机和动力总效率高。电机可以在减速时回收制动能，或在加速时为发动机提供动力支持。图

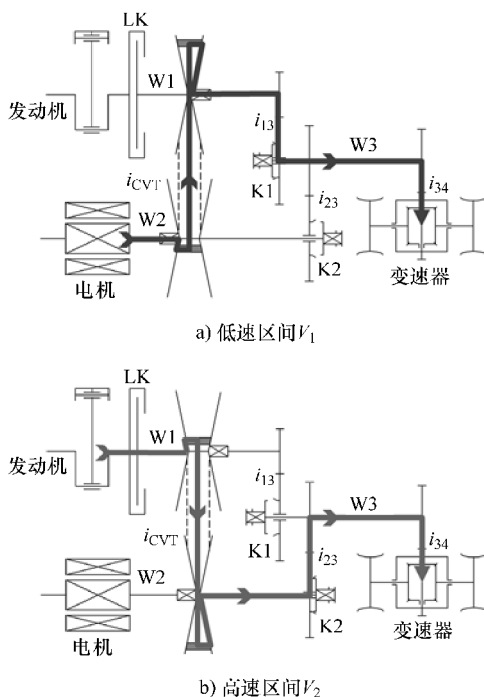


图 4.31 $i\sqrt{i}$ 驱动系统的结构和原理图

4.32 为 iV/i 变速器及其带有附件、双配重飞轮的 CAD 模型。

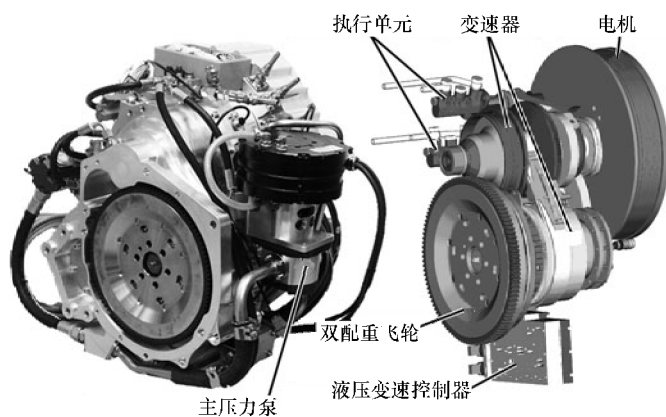


图 4.32 iV/i 变速器附件和 CAD 模型

一个带 CVT 无级变速器的串联式混合驱动动力总成实例是本田 IMA 混合动力系统。

功率分配式变速器的自主开发以混合动力技术为基础，并装配在一个系列的车辆上。因此，该变速器成本相对高，必须转嫁到车辆的售价上。功率分配式无级变速器由一个或多个行星齿轮机构组成。例如奔驰 ML 450 混合动力汽车使用的双模式变速器，参见本书第 6 章的图 6.55。功率分配式变速器也应用于宝马 X6 高效混合动力汽车。为了分摊高昂的开发费用，宝马、戴姆勒和通用汽车公司联手合作，因此采用该变速器的车型也较为多。丰田普锐斯也使用功率分配式变速器，且将电动机集成在变速器内，如图 4.33 所示。

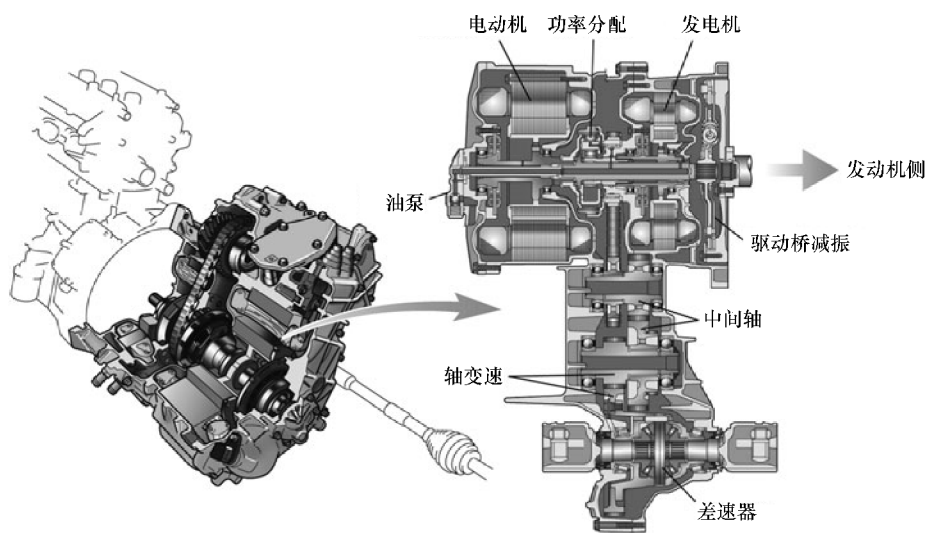


图 4.33 丰田普锐斯变速器及其电机配置

4.3 功率电子装置（整流器）

功率电子装置的功能在于调节蓄能器内储存的电能与电机的需求。储能器电压通常是直流电压。直流电压大小决定蓄能器当前的充放电能力。为了保证额定转速及额定转矩，电机由频率、振幅和相位不断变化的三相交流电压驱动。倒车（反转）通过改变相位完成，从而实现电动倒车。

除了驱动电机以外，绝缘型直流电压转换器（DC/DC 转换器）对于 12V 车载电网供电而言是必不可少的。直流电压转换器也可应用于高压电平调节，如燃料电池汽车。

电流的转换基本分为四种形式，如图 4.34 所示：

(1) 交流电压转换为直流电压：整流器将单相或多相交流电压转换为直流电压。

(2) 直流电压转换为直流电压：直流电压转换器（DC/DC 转换器）改变电压的大小。根据不同的输入和输出电压的大小，直流电压转换器分为升压转换器或降压转换器。

(3) 直流电压转换为交流电压：逆变器将直流电压转换成预设振幅和频率的交流电压。

(4) 交流电压转换为交流电压：逆变器从一个给定的交流电压转换成一个不同振幅和频率的交流电压（这里只涉及完整性原因）。

图 4.35 所示为整流器应用在混合动力汽车上的典型案例。由于需要回收电能，整流器必须双向工作。对于 12V 车载电网供电而言，主要的能流方向是从蓄能器（高压蓄电池）流向车载电网。根据系统要求，也可以通过直流电压转换器实现双向性，例如由车载电网提供起动辅助。

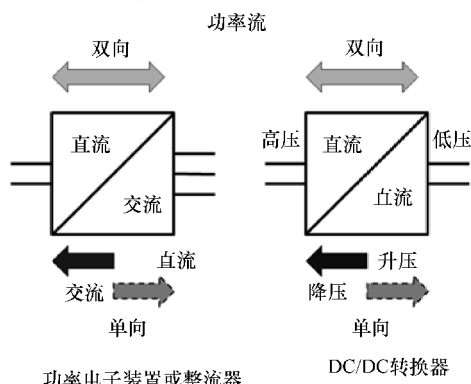


图 4.34 电力能源转换的可能性

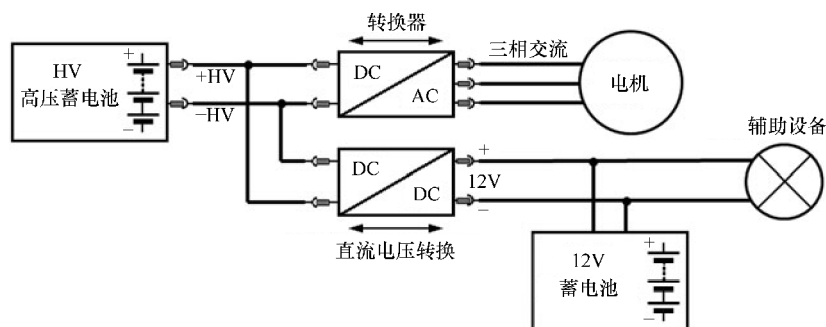


图 4.35 混合动力汽车的功率电子原理图

电子元件之间快速切换可以体现整流器的功能。这些元件为能量损耗最低的功率半导体，用于导电或限电。在导电状态下，电压下降，而在限电状态下，有反向电流通过，两种情况下都会产生电能损耗，损失的电能转化为热能。电压通过电子元件后降低和电流流过共

同导致功率损耗，但电流导通产生的损耗远大于限电产生的损耗。除了固定的电能损耗，还有所谓的开关损耗，这种损耗出现在从导电切换到限电或相反过程中。开关损耗直接与频率成正比，此处损失的电能用于开关是打开或闭合（开关频率）。

为了防止组件受热损坏，需将热量导出，因此电力电子装置或配有散热片，或置于冷却循环中。此外，布局时需要注意的是，电子元件的电能损耗会导致传动装置的整体效率下降。

4.3.1 半导体器件

对电动汽车或混合动力汽车电力驱动系统而言，首先受到关注的是可以控制电流量的半导体。这些半导体器件原则上包括双极晶体管、场效应晶体管和绝缘栅双极晶体管（IGBT）。

双极晶体管通过晶体管基极（B）上的辅助电流控制集电极（C）和发射极（E）之间的主电流，如图 4.36 所示。双极晶体管可以将强电流通过低传输损耗接通。其缺点是器件中开关损耗较大，其损失转换成的热量必须导出，且通过辅助电流进行控制较为复杂。目前，市场上的双极晶体管几乎被绝缘栅双极晶体管取代。

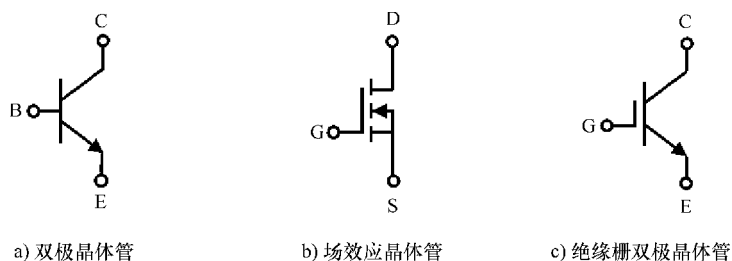


图 4.36 双极晶体管、场效应晶体管和绝缘栅双极晶体管

场效应晶体管（FET）通过元件栅极（G）的控制电压切换成导电状态，如图 4.36 所示。通过这一简单控制以及少量的开关损耗可以达到非常高的切换频率。电阻由于反向电压增大而激增，所以其应用电压范围在中压区（<200V）。

IGBT（绝缘栅双极晶体管）结合双极晶体管和场效应晶体管的优点。绝缘栅双极晶体管通过控制电压进行控制，也就是通过内部的电场效应和双极结构，可应用于强电流环境中。IGBT 驱动电路的特殊结构使其即使在电流非常强（如短路）的情况下也可以安全断开。该功能的优点在于，该电路一旦出现故障，可以在 IGBT 控制下停止供电。IGBT 是功率电子技术中最重要的器件。

图 4.37 为半导体器件的功率分级，适用于牵引驱动的 IGBT 的尺寸约在图中中间范围，在此仅用于模块技术。最大值为电池电压 450V 通过 IGBT 增加到 600V 或 650V 仅就电压而言，根据制造商特定的反向电压系列如 1200V 型或 1800V 型。

IGBT 凭借上述优势应用于电力驱动。小功率或低电池电压情况下，原则上也可以采用金属氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET）。

4.3.2 电路

为了阐述不同整流器的效果，首先介绍单相桥接电路，如图 4.38 所示。该电路实现一

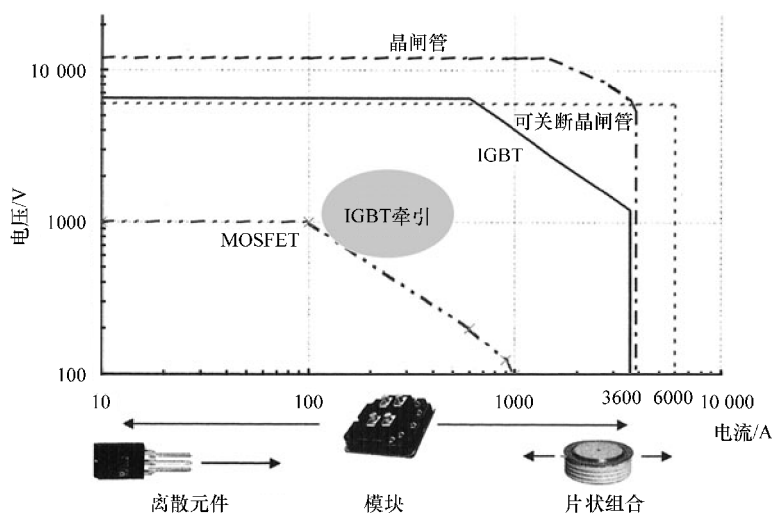


图 4.37 半导体器件的功率级别（通、断电流）

个 DC/DC 转换器的双向功能性，同时也体现了常规三相驱动转换器的基础。

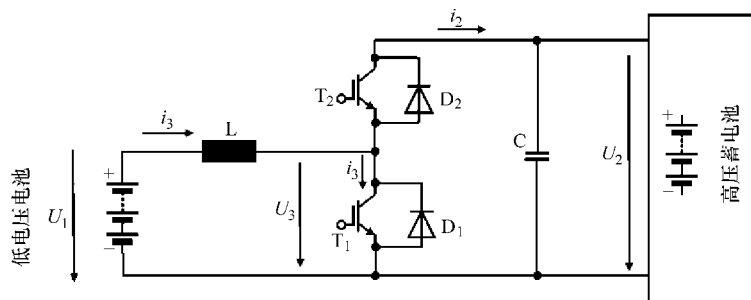


图 4.38 单相桥式开关的拓扑学简图（升/降压调节）

例如，电能从低电压电池转移到高电压电池是需要升压。电池电压 U_1 通过晶体管 T_1 后在感应器 L 处周期性短路。此外感应器 L （馈电扼流圈）储存磁能。晶体管闭合时，电流 i_1 增加到预定阈值，如图 4.39 所示。然后晶体管断开，电流 i_1 通过二极管 D_2 流向高电压电池 U_2 。在理想条件下，通过无损开关元件传递的功率 $P_1 = P_2$ 。

反之在如图 4.38 所示的低电压电池充电状态下的拓扑结构中，高压电池中的电压必须通过降压处理。晶体管 T_2 闭合后，电流 i_2 从逆变器 U_2 流出，通过感应线圈到低电压电池 U_1 。当晶体管 T_2 断开，电流就会流经二极管 D_1 。由于给电池充电，电流 i_1 在负荷电路中衰减。当负荷电路时间常数非常大时，电流接近恒定。电压 U_1 的平均值由占空比（接通时间 t_{ein} /周期时间 T ）确定。

升/降压功能一体化获得更多的操控自由度和功能性，可以弥补其成本较高的缺点。除高压直流电网和低压直流电网之间的能量交换以外，升高的电池电压水平还可以使蓄电池单元格保持较少的数量且在电压高的情况使电流减小。丰田普锐斯从第二代起采用该电力电子电路，参见第 6 章的图 6.4。DC/DC 转换器位于高压电网和整流器之间的另一个优势在于可以使牵引电压的选择与电池电压无关。牵引电池可用的输出电压随电池电量波动，范围通常

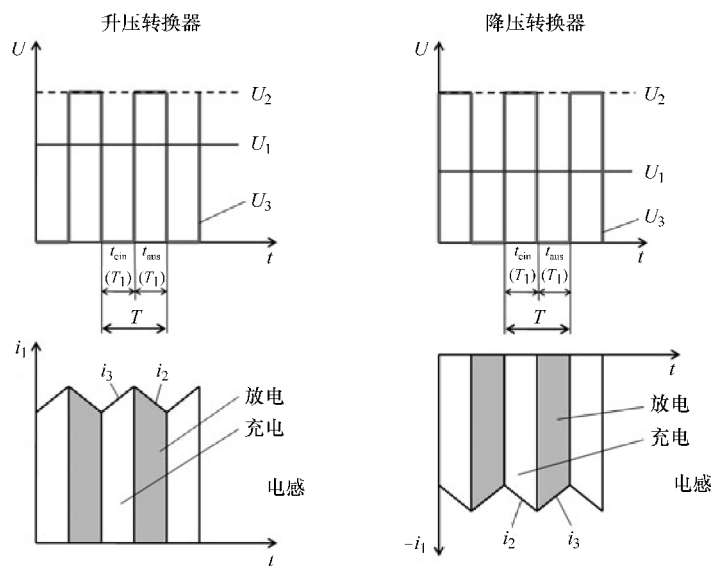


图 4.39 升/降压调节器的电压 - 电流变化原理图

在其额定电压的 80% ~ 120%。

将一台异步电机的工作电压设定为电池的额定电压，会导致电压下降并导致角点位移，如图 4.40 所示，从而导致电机的动力特性减弱。如果将该异步电机的工作电压设定为低于电池额定电压，会导致该电机体积过大，甚至超过常规尺寸。

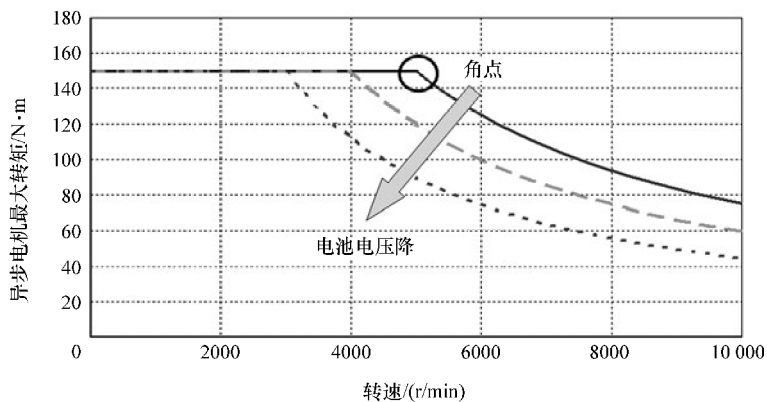


图 4.40 异步电机的典型特征曲线

除了直流电压的升高和降低以外，可以通过适当选择占空比产生任意电压大小以及不同的振幅和频率。通过脉冲宽度调制（PWM）可以由直流电产生正弦交流电压。为了减少谐波交流电压，半导体器件开关频率必须明显高于产生的输出电压的基础频率。

目前，通常只有转换器与直流中间电路和硬开关整流器相结合。其电力电子结构基于前面描述的减压转换器（DC/DC 转换器）如图 4.38 所示，以及派生的全桥拓扑结构如图 4.41 所示。

以图 4.42 为例，说明基波频率变化和相应的三相电压的振幅。为了便于描述，脉冲宽

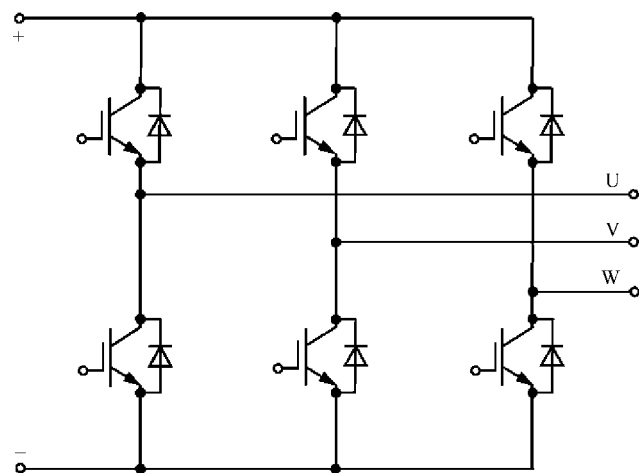


图 4.41 三相桥式开关

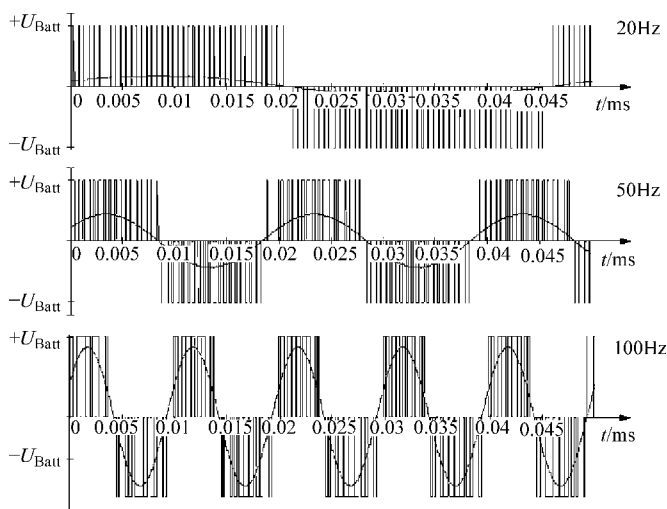


图 4.42 通过脉冲宽度调制来改变电压和频率的例子（用于电机供电）

度调制的开关频率为 1000Hz。硬开关的 IGBT 拓扑的常规开关频率为 10kHz。软开关功率电子单元可以具有明显更高的开关频率，如 24kHz。IGBT 可以在电压归零或电流归零时接通，因此可以达到最佳调节质量，但布线成本增加。

图 4.43 所示为功率电子应用于带 400V 车载电网电力驱动装置上的原理示意图。常规 IGBT 作为该驱动装置的功率半导体器件。其功率电子系统部分由中间电路电容器、布线和水冷式三相全桥开关构成。

图 4.43 为电力驱动常规线路结构。电动机的温度信号、编码器信号以及三台发电机电流测量值中的两个值被提供给控制装置。永磁同步电机（PSM）的驱动和控制要求了解当前转子角位置。实际转矩通过机械模拟进行内部计算。整流器控制范围包括转速和转矩的计算规则、脉冲宽度调制、传感器读取及更高级的车辆控制装置的接口。其控制通过控制器局域网（CAN-BUS）完成。

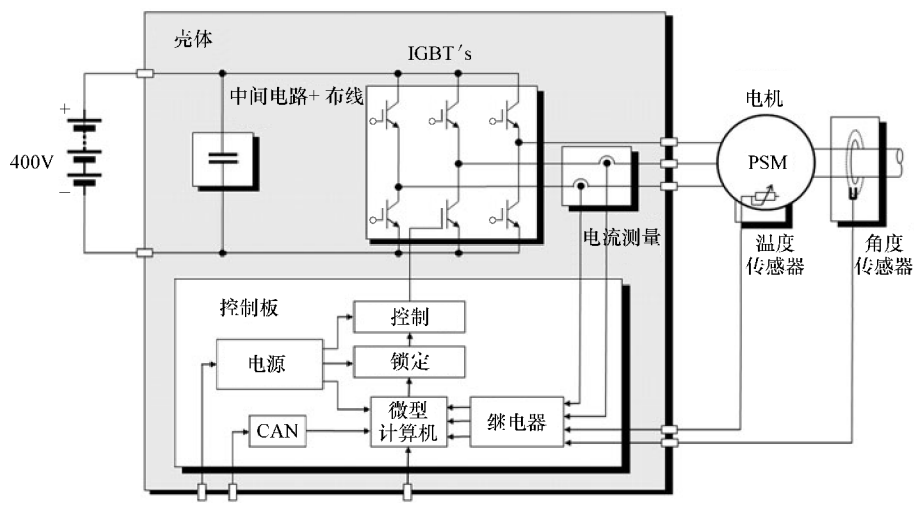


图 4.43 电驱动技术中的功率电子装置

4.4 蓄能器

4.4.1 概述

蓄能器的用途在于储备能量，并在需要的时候再利用。原则上，蓄能器的类型通过其蓄能方式进行区分。图 4.44 所示为已经和将可能应用在汽车领域的各种形式的蓄能器。

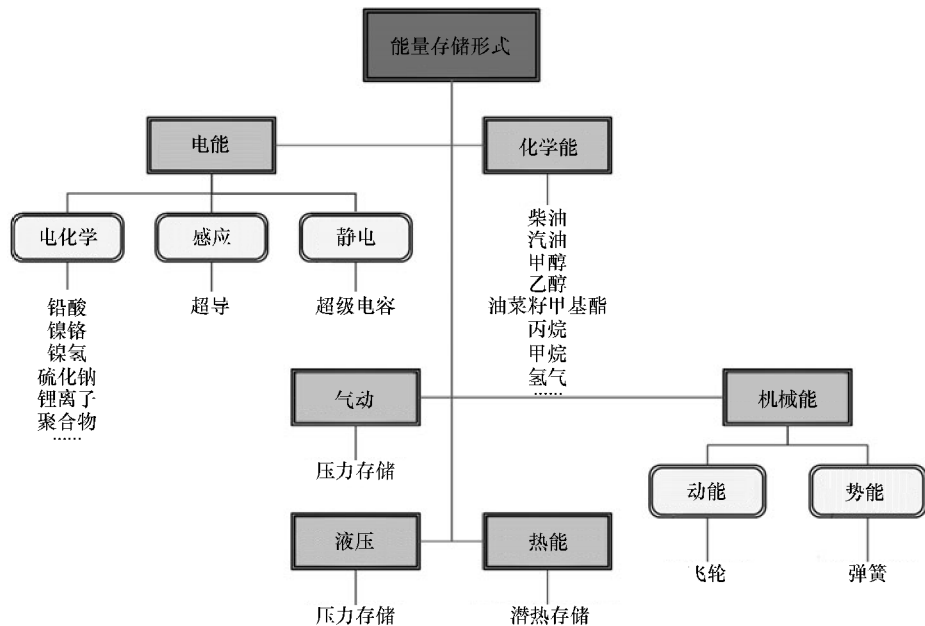


图 4.44 能量存储形式

并非所有蓄能器的使用都以驱动为目的，因为车辆上要求安装的蓄能器必须是多元化的，如图 4.45 所示。常规化学能载体（如汽油、柴油）和车辆上可充放的蓄能器，与电力

和机械系统相结合意义重大，其原因是常规燃料所含大量能量在短时间通过燃烧对系统进行补给，并在通过辅助操作为另一套驱动系统提供了额外的自由度。目前，在客车和货车领域，混合动力车辆采用首选的辅助蓄能器为电化学蓄能系统，主要形式为高压电池以及重新启用的电容系统（超级电容）。

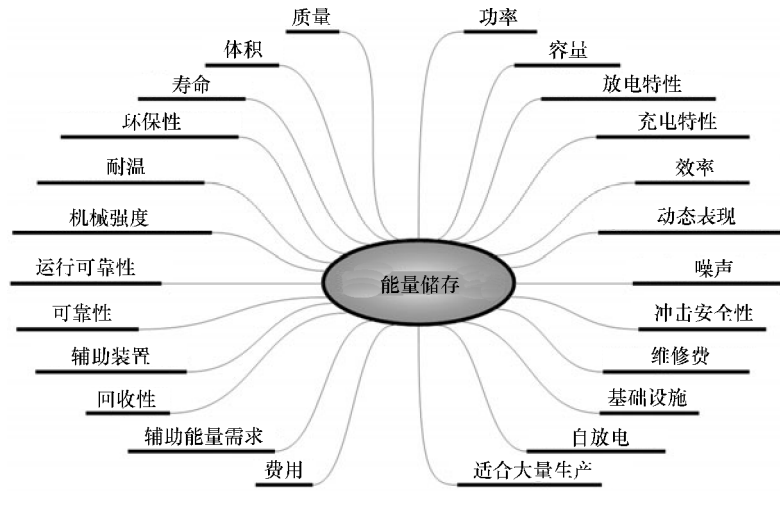


图 4.45 车用能量存储设置的要求

图 4.46 为所选电池系统与汽油在理论和实际能量密度的对比。图 4.47 为不同蓄能系统在行驶里程为 100km 的前提下重量和体积的对比。此外，柱状图体现了典型油耗值，被视为整个蓄能系统的对应值。

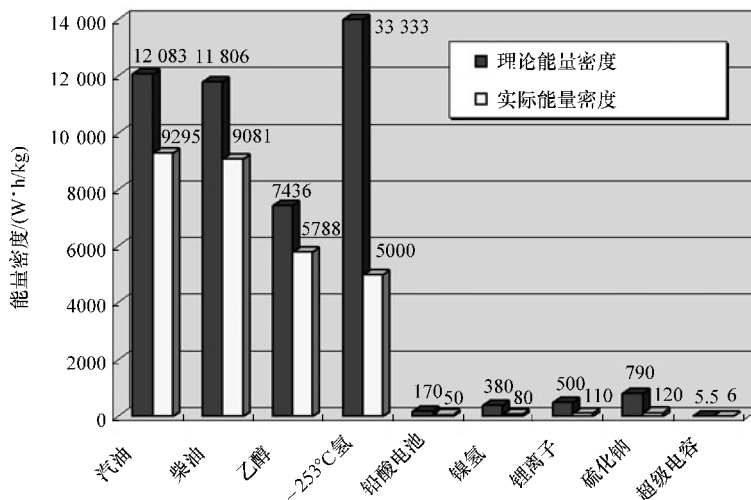


图 4.46 各种燃料和电池的理论 and 实际能量密度（与汽油相比）

从这两张图中可以看出，牵引电池是混合动力系统中的关键组成部分。除了相对较低的比能量和能量密度以外，高昂的成本问题也是一个巨大的挑战。

为了配合大规模开发工作的需要，越来越多的汽车制造商和供应商结为联盟。例如，江森自控公司（包括瓦尔塔）和 SAFT 电池公司组成的合资公司。合资公司作为其两家母公司

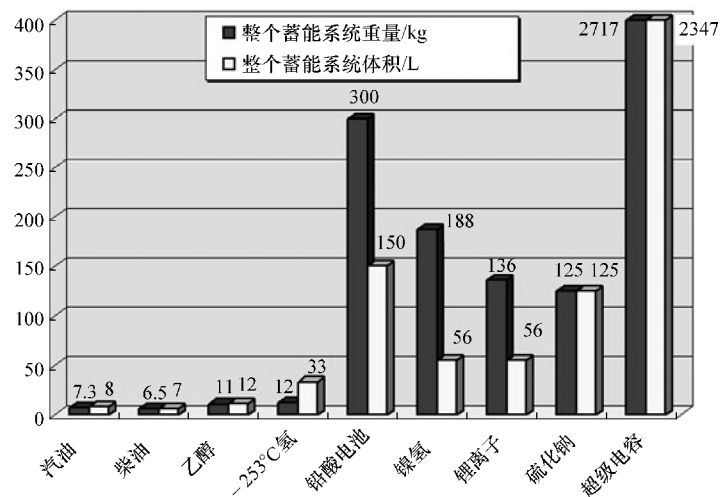


图 4.47 满足 100km 续航里程所需要的蓄能系统的质量和体积

的全权代表，研发、生产和销售混合动力汽车和纯电动车所需的镍氢电池、锂离子电池。另一个例子是伊诺力克工业股份有限公司和戴姆勒股份有限公司的合资公司 Li - Tec 电池有限公司。该合资公司研发、生产和销售应用于汽车领域的大型锂离子电池和应用于工业和电站的电池系统。博世公司和韩国三星 SDI 的合资公司 SB LiMotive 开发轿车用锂离子电池，于 2010 年开始投产。

发动机燃料也就是化学能源载体不在本书讨论范围之内。本书着重讨论可以与常规传动系统结合，应用到混合动力汽车上的能量储存方式。下列为已知可应用于混合动力系统中的可逆式蓄能系统：

- (1) 蓄电池（过程可逆，电池可充电）；
- (2) 高温蓄电池（可逆，可充电，300 ~ 400℃）；
- (3) 液流电池；
- (4) 超级电容；
- (5) 飞轮蓄能器；
- (6) 液压气动蓄能器。

由于混合动力汽车的这一领域到目前只开发了电气系统作为唯一的辅助蓄能器，电气系统的特定要求和特征如下，原则上以下陈述也适用于其他蓄能系统。

在汽车行业，根据不同的使用目的，对蓄能系统即蓄能器性能的要求可能有巨大差异。表 4.3 为电池系统在不同汽车的应用和需求。

表 4.3 电池系统在汽车上的应用和需求

应用	电力续航能力	能量/功率要求
电动汽车	> 150km	> 20kW · h/ > 40kW
混合动力公交车	有限续航能力	> 10kW · h/ > 80kW
全混合动力轿车	短时电力续航能力	1 ~ 3kW · h/ 25 ~ 50kW
中度混合动力轿车	无电力续航能力	0.5 ~ 1kW · h/ < 20kW

选择符合表 4.3 中应用的蓄能系统取决于下列系统属性：

1) 比能量（重量） $W \cdot h/kg$ ：该属性指与重量相关的电池系统蓄能能力。当需要长时间连续放电和充电时，比能量起到重要作用。在汽车行业中，该参数对电池续航里程尤其重要。

2) 能量密度（体积） $W \cdot h/l$ ：该参数是指能量存储系统所需的蓄能体积。特别是在电池供电的电动汽车，其能量密度是该车辆自主性的决定性参数。

3) 比功率（重量） W/kg ：当所需最大充放电时间短（ $<1min$ ）时，比功率参数尤其重要。在汽车领域，尤其是对起/停过程和混合动力技术中加速和制动能量回收过程意义重大。

4) 功率密度（体积） W/l ：混合动力汽车需要较高的功率密度，在空间有限的情况下整个电力系统的体积会和有限的车辆空间产生冲突。

5) 能量通过率 $W \cdot h$ ：能量通过率与相应的负荷循环决定了电极板的寿命。某些情况下将会给出以往常见的能量通过率参数或循环次数。但是，在此不考虑电池电压，虽然它对电池寿命有显著影响。电容量 $A \cdot h$ 表示电极板和系统可以容纳的电荷量。因为只有少量的能量移动（能量 = 电容量 $\times$ 额定电压），混合动力系统的电池容量通常较小。而电动汽车的电池容量较大，但效率有限，原因是能量密度大。容量通过率一般是电池额定容量的倍数。常规车辆对 12V 起动蓄电池的能量通过率无太高要求。在电池频繁使用的情况下，如混合动力汽车在有规律地加速或制动情况下，比能量通过率是选择合适的蓄能系统的关键标准。

6) 使用寿命：这个参数表示的是电池在不计算电力负荷和运行情况下的老化。由时间引起的电池容量损失和功率损失称为最大使用寿命。引起电池老化的原因除了工作以外，还有高度温度依赖性和稳定的电解液成分的分解。仅从成本角度而言，混合动力汽车的理想电池系统的寿命最好跟车辆本身的寿命一致。这就意味着，电池的寿命至少要在 10 年。

7) 循环寿命：循环寿命与最大能量通过率紧密相关。该参数表明一个特定的负荷循环在给定的环境条件下的重复次数，直至电池寿命用尽。循环寿命小于日历寿命是由于有害影响的累积，其起作用导致在有效物质的机械工作、充电副作用（电解质损失）等情况下出现的降解作用。

在下面的章节中将详细介绍二次电池的基本功能，并举例说明蓄电池对混合动力汽车应用的重要性。

4.4.2 二次电池

二次电池也被称为蓄电池，以区分不可再充电的一次电池。二次电池主要作为电蓄能器，因为跟一次电池不同的是二次电池可以逆向工作，也就是说二次电池可以充电，与超级电容相比，其能量密度大。

二次电池（蓄电池）具有电离池或电化学池。在电离池或电化学池中，化学能转化为电能以满足能量储存的需要以及逆向转化。在电解槽中，两种不同的金属（电极）浸在电解质里，如图 4.48 所示。两个电极作为能量转换器和储能。在两种金属（极）上形成电流输入和输出。电解质中只产生离子交换，无电子传送。电解质可以是液体、固体或胶体，并与电极之间不产生相互作用。两个电极之间有一层隔板，其作用是防止两极接触。该隔板应尽量薄，并具有良好的离子传导性。

在放电过程中，电子流从非贵金属电极（负极或阳极）通过用电器到正极（阴极），如

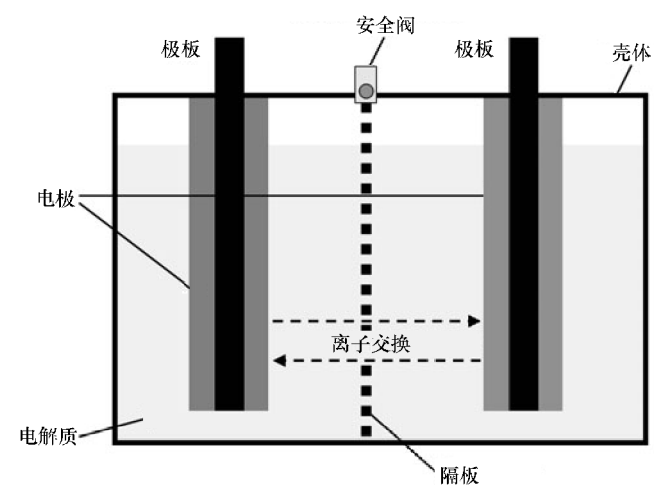


图 4.48 蓄电池的组成

图 4.49 所示。非贵金属溶解（氧化），保证电子流动。在正极上，正离子流入电解质中，如有减少，正极继续析出正离子。通过电解质进行离子交换，从而产生电流。金属板之间的电压强度由金属材料 and 电解质成分决定。电化序是各种金属电化潜力的排列顺序，见表 4.4。其中字母“z”表示交换的电子的数目。不同的金属形成不同的极值电压。

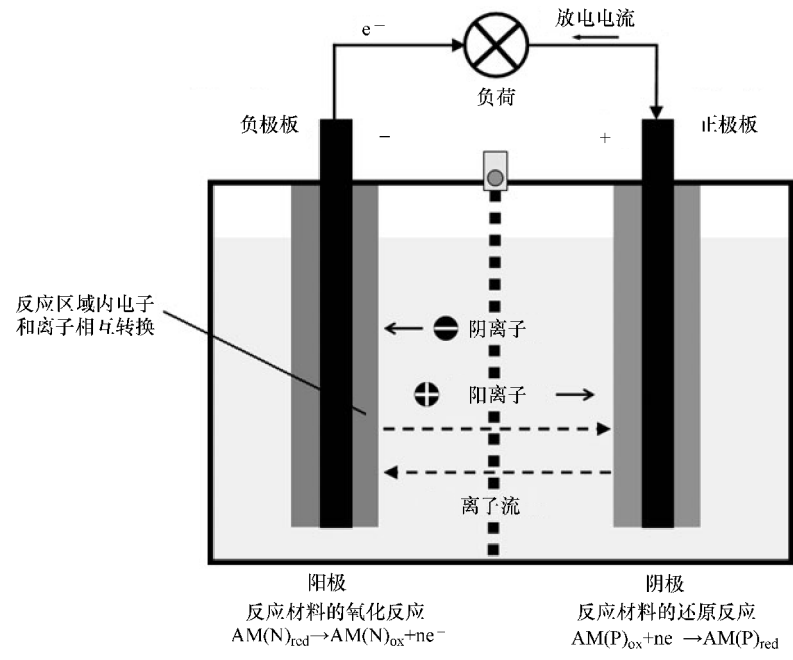


图 4.49 蓄电池放电过程原理图（电子和离子流的方向按照放电情况表示）

充电时，外部电压加载到电极上，从而改变电流方向。
蓄电池通常由排列在一个壳体中的一个或多个串联或并联在一起的电极板组成，并提供

绝缘（电池模式）。除了能量存储系统以外，工作中需要的外围配置也属于电池的组成部分，如加热和冷却系统，电力总开关（主接触器）和蓄电池管理系统。蓄电池管理系统的作用在于监控蓄电池，防止其过度充放电。

表 4.4 电化序

元素缩写	$\rightleftharpoons$ 氧化形式	$+ze^-$	极值电压/V
Li	$\rightleftharpoons Li^+$	$+e^-$	-3.045
Na	$\rightleftharpoons Na^+$	$+e^-$	-2.71
Mg	$\rightleftharpoons Mg^{2+}$	$+2e^-$	-2.36
Al	$\rightleftharpoons Al^{3+}$	$+3e^-$	-1.66
Zn	$\rightleftharpoons Zn^{2+}$	$+2e^-$	-0.76
Fe	$\rightleftharpoons Fe^{2+}$	$+2e^-$	-0.41
Cd	$\rightleftharpoons Cd^{2+}$	$+2e^-$	-0.40
$Pb + SO_4^{2-}$	$\rightleftharpoons PbSO_4$	$+2e^-$	-0.36
Ni	$\rightleftharpoons Ni^{2+}$	$+2e^-$	-0.25
Sn	$\rightleftharpoons Sn^{2+}$	$+2e^-$	-0.14
Pb	$\rightleftharpoons Pb^{2+}$	$+2e^-$	-0.13
Fe	$\rightleftharpoons Fe^{3+}$	$+3e^-$	-0.036
$H_2 + 2H_2O$	$\rightleftharpoons 2H_3O^+$	$+2e^-$	0
Sn^{2+}	$\rightleftharpoons Sn^{4+}$	$+4e^-$	+0.15
Cu^+	$\rightleftharpoons Cu^{2+}$	$+e^-$	+0.15
$SO_2 + 6H_2O$	$\rightleftharpoons SO_4^{2-} + 4H_3O^+$	$+2e^-$	+0.17
Cu	$\rightleftharpoons Cu^{2+}$	$+2e^-$	+0.34
$S + 3H_2O$	$\rightleftharpoons Cu^+ + H_2SO_3 + 4H^+$	$+2e^-$	+0.45
Cu	$\rightleftharpoons Cu^+$	$+e^-$	+0.52
Fe^{2+}	$\rightleftharpoons Fe^{3+}$	$+3^-$	+0.77
Ag	$\rightleftharpoons Ag^+$	$+e^-$	+0.80
$2Br$	$\rightleftharpoons Br_2$	$+2e^-$	+1.07
$6H_2O$	$\rightleftharpoons O_2 + 4H_3O^+$	$+4e^-$	+1.23
$2Cr^{3+} + 21 H_2O$	$\rightleftharpoons Cr_2O_7^{2-} + 14H_3O^+$	$+6e^-$	+1.33
$2Cl^-$	$\rightleftharpoons Cl_2$	$+2e^-$	+1.36
$Mn^{2+} + 12H_2O$	$\rightleftharpoons MnO_4^- + 8H_3O^+$	$+5e^-$	+1.51
$Cl_2 + 2H_2O$	$\rightleftharpoons 2HOCl + 2H^+$	$+2e^-$	+1.63
$PbSO_4 + 2H_2O$	$\rightleftharpoons PbO_2 + SO_4^{2-} + 4H^+$	$+2e^-$	+1.67
$3H_2O + O_2$	$\rightleftharpoons O_3 + 2H_3O^+$	$+2e^-$	+2.07
$2F^-$	$\rightleftharpoons F_2$	$+2e^-$	+2.87

对于能量的研究

蓄电池产生的一部分能量会被充放电损失抵消。蓄电池损失来自下列因素：内阻造成电

热损失（加热）、由气泡造成的充电损失、自放电（与自身电化反应、温度有关）。

蓄电池参数

1) 额定电压：电化学电池的额定电压取决于电极所使用的材料，例如：铅酸蓄电池的额定电压为 2V，钢电池为 1.2V。电池的额定电压为电极板额定电压与并联电池的数量之积。

2) 端电压：该参数与电池工作状态相关，与额定电压相比或多或少有些偏差。

3) 开路电压 U_{00} ：该参数是在静止状态下，即所有内部调节过程结束之后，在蓄电池两个极柱处测得。开路电压是指平衡电压的副反应除外，这一差别通常忽略不计。平衡电压为理论值，即化学能完全转化为电能，因此，开路电压通常受电池充电率的影响。

4) 空载电压 U_0 ：空载电压是在电池无负载状态下进行测量的。在负荷阶段结束之后，通过内部调节空载电压一直处于变化中。通过与温度相关的时间函数，可以从空载电压得出开路电压。大多数情况下，空载电压也受电池充电效率的影响，因此大多数电池的空载电压可用一个线性区域来表示，如图 4.50 所示。

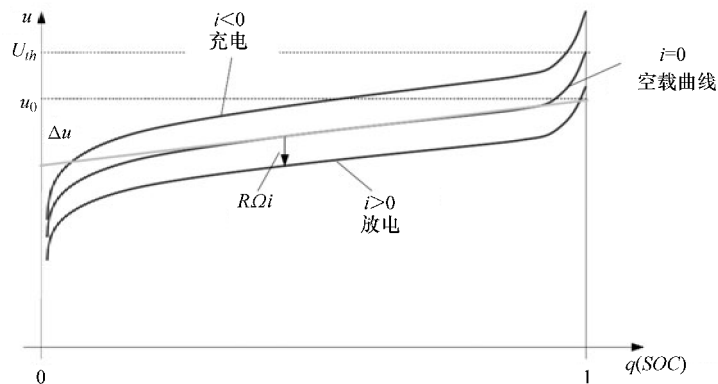


图 4.50 依赖于电流和充电率的典型电池电压比例

5) 放电终止电压：放电过程中，电池电压达到这一生产商给出的终端电压时，放电终止。该参数受温度和电池工作方式影响，即在低温和脉冲负荷的情况下可将放电终止电压调低。

6) 充电终止电压：充电过程中，电池电压达到该参数值，电池将停止充电。对大多数电池而言，过度充放电会导致电池寿命降低。

7) 电容量：电容量是指电池中储存的充电量（理论电容量）或特定情况下可以释放的充电量（实际电容量）。电容量一般用安培小时（A·h）表示，极少用库伦表示。理论电容量跟电池中的有效材料相关。电池的实际电容量很大程度上受放电条件（如负载、放电终止电压和温度）和电池的自身状态（如放电之前的存放时间和条件）影响，如图 4.51 和图 4.52 所示，因此电池电容量由标准放电过程和标准放电条件决定。

电池的额定电容量通常与限定放电条件同时给出，如持续时间： K_5 、 I_5 。 $K_5 = 100\text{A} \cdot \text{h}$ 表示以每小时 20A 的电量，放电 5 个小时，而不是 1 小时放电 100A。该参数通常表示为充放电率（C-rate）。每次流过的电流以 C-rate 的几分之几或倍数表示。以一个 $2\text{A} \cdot \text{h}$ 电池

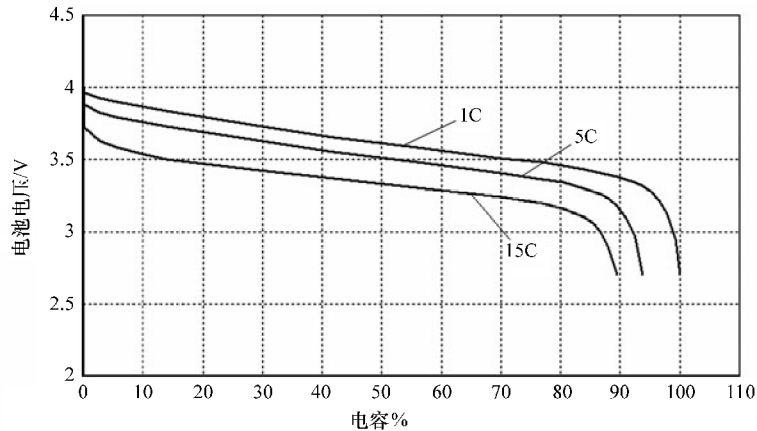


图 4.51 电压和电容对锂离子电池放电曲线的影响

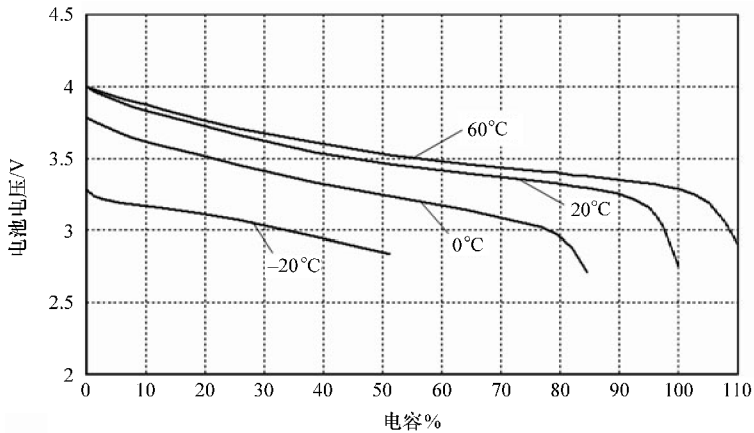


图 4.52 电压和电容对锂离子电池的温度曲线的影响

为例如果标明 3C，表示该电池以 6A ($3 \times 2A$) 的电流放电 1/3 小时；如果标明 0.1C，表示该电池以 0.2A ($0.1 \times 2A$) 放电 10 小时。C-rate 偶尔也可以用 CA 和 It 表示。

8) 充电状态 (SOC)：电池的充电状态用额定电容的百分比表示。

9) 放电深度 (DOD)：该参数值为电池的放电率，用额定电容的百分比表示。放电深度 100% 表示电池完全放电。

10) 内阻 R_i ：用开路电压 U_R 与端电压 U_K 之差除以端电流，参见式 (4-5)。内阻取决于电池温度、充电状态、电池的老化程度（老化程度越严重，内阻越大）和负载时间（尤其是混合动力范围的脉冲负荷）。

$$R_i = \frac{U_R - U_K}{I_K} \quad (4-5)$$

式中 R_i ——电池内阻 (Ω)；

U_R ——电池开路电压 (V)；

U_K ——端电压 (V)；

I_K ——端电流 (A)。

- 11) 工作能力 (储存能量): $W \cdot h$ 。
- 12) 安培小时有效系数: $n_{Ah} = \text{输出 } A \cdot h / \text{输入 } A \cdot h$ 。
- 13) 瓦特小时有效系数, $n_{Wh} = \text{输出 } W \cdot h / \text{输入 } W \cdot h$ 。
- 14) 蓄电效率系数, 参见图 4.53。

$$\eta_{\text{Speicher}} = \frac{I_{\text{Entlade}} \int_0^{\text{Entladezeit}} U_{\text{Entlade}} dt}{I_{\text{Lade}} \int_0^{\text{Lade}} U_{\text{Lade}} dt} \quad (4-6)$$

式中 η_{Speicher} ——蓄电效率系数;
 I_{Entlade} ——放电电流 (A);
 U_{Entlade} ——放电电压 (V);
 I_{Lade} ——充电电流 (A);
 U_{Lade} ——充电电压 (V)。

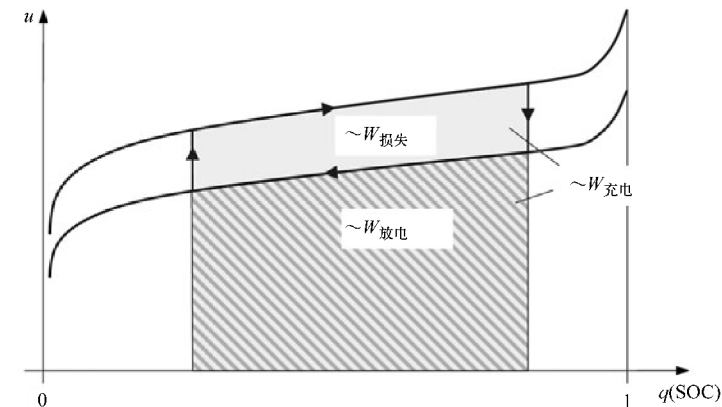
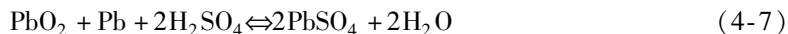


图 4.53 用一个充放电循环说明电池的蓄电效率

4.4.3 铅酸电池

功能

铅酸电池的正极使用二氧化铅 (PbO_2)，负极使用颗粒细、海绵状的金属铅块。电解液含约 35% 的硫酸。电极板之间使用多孔聚乙烯膜或玻璃纤维无纺布作为隔板。其化学反应方程式为



放电过程中，硫酸铅溶液中的 PbO_2 为正极，金属铅为负极。与其他电池系统不同，铅酸电池的电解质积极参与放电反应，造成硫酸溶液的浓度随放电程度降低。单个铅酸电池空载电压为 2.1V。如果该电池应用在工作电压约 200V 的车辆上，大约需要 100 块电极板。

结构

在技术上要对以下 3 种铅酸电池进行区别：液态铅酸电池、胶体铅酸电池、AGM 铅酸

电池。

目前，起动电池通常使用液态酸，原因是该类电池所受连续负荷循环相对较少。循环负荷较重的牵引电池使用胶状或吸附在 AGM 纤维内的电解质。AGM 吸附电解质不仅使电池具有较高的安全性和易于管理的优点，还有一个相当重要的技术根据：可以避免过度放电时形成酸层，该情况出现在液态铅酸电池中，会迅速降低电池效率。图 4.54 为单板式铅酸电池的基本结构。

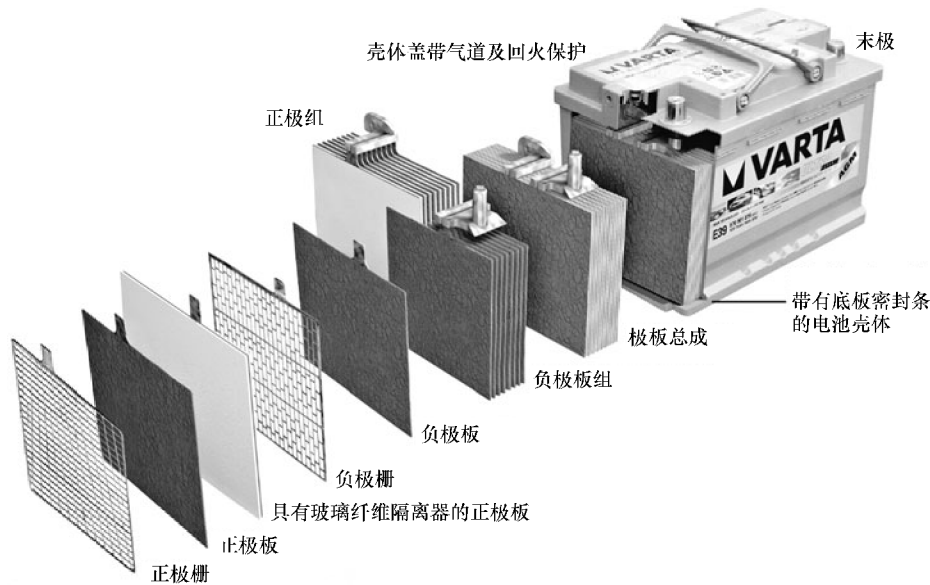


图 4.54 瓦尔塔起动用电池的结构

该电池模块中，一定数量的正极板和负极板交叉排列，并由隔板隔开。在这些单元格内的正负电极分别通过极桥连接，并整合，电流通过整合后的电极到达电池模块中相邻的电解槽或导出。目前，几乎所有车载铅酸电池都是该结构。差异主要在于电极结构、电解槽的几何形状和电解质的性质和类型。使用更薄的电极，可以普遍提高电池性能参数，但这样一来能量密度和使用寿命都会下降。

卷轴直立式电极板是铅酸电池的特殊结构，如图 4.55 所示。该结构中，两极为板式电极，呈螺旋状，由玻璃纤维无纺布隔开。在卷轴顶部，电极的边缘通过集电板导电。该设计比常规铅酸电池具有更高的负荷能力（尤其是在低温条件下）和更长的使用寿命，因此对混合动力应用而言颇具吸引力。

表 4.5 铅酸电池的参数

		高能量	高功率
单位能量/($\text{W} \cdot \text{h}/\text{kg}$)		35	32
单位功率/(W/kg)		200	430
能量密度/($\text{W} \cdot \text{h}/\text{l}$)		90	68
功率密度/(W/l)		510	910
循环次数	放电深度 80%	700	350
	放电深度 5%	> 2000	1800



图 4.55 OPTIMA 品牌铅酸电池的卷轴形式

目前在常规车辆应用中占主导地位的铅酸电池并不能完全满足混合动力汽车的要求。从经济性角度出发，铅酸电池在目前已知的电池系统中优势明显，由于成本低廉，将继续使用。近几十年，铅酸电池应用证明了其作为起动电池是有效的。通过技术改进，如降低电极的位置，改良电极栅结构，改变连接顺序，这大大提高了铅酸电池的性能。例如 VB 汽车电池有限责任公司的生产的性能优化型 POB（POB = 能量优化电池）就进行了上述改进。电解质吸附在玻璃纤维无纺布 AGM（Absorptive Glass Mat）中，该技术大大提高了铅酸电池的循环使用寿命。

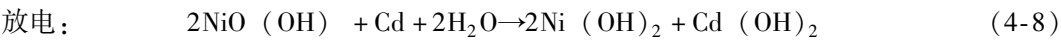
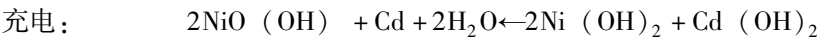
尽管铅酸电池在过去几年内有长足的改善，但是该系统还无法达到混合动力汽车在能量通过率和循环稳定性的极端要求，然而铅酸电池完全符合微混合动力汽车，如起/停系统和慢加速操作的要求。

4.4.4 镍镉电池

结构

在充电状态下，镍镉电池的金属板两端的负极主要成分为镉粉，正极为三氧化二镍和氢氧化镍。电解液为浓度 20% 的氢氧化钾溶液。该组合提供 1.3V 的电压。其优点是内阻小、导电好、过度充放电和低温条件下表现稳固。

镍镉电池电极板中化学反应：



由于镍镉电池中含重金属镉，在很多领域被禁止使用，因此不会应用在未来的汽车上。

4.4.5 镍氢电池

功能

镍氢电池是镍镉电池的替代品，后者无论是在技术上还是环境可持续性发展能力上都不适用于混合动力汽车。镍氢电池与镍镉电池最大的区别在于负极：在镍氢电池的负极上，能吸收氢的金属（金属氢化合物）作为活跃物质代替氢氧化镉。也如镍镉电池的电解质，镍氢电池的主要成分为高度浓缩的氢氧化钾（KOH）。隔板使用以聚乙烯（PE）/聚丙烯（PP）为基础聚合物的纤维无纺布。

镍氢电池系统电极板中化学反应：



显著特点是基础反应中无液体电解质参与，电解质只是作为电荷载体——质子的传输介质。与镍镉电池相似，镍氢电池的空载电压较低。受充电状况影响，其空载电压为 1.25 ~ 1.35V。镍氢电池的一个特征是由电化学条件决定电压滞后，其能效可达 92%。镍氢电池工作温度较广，尤其是在汽车领域中应用广泛。

跟其他电池系统一样，可反应的活性物质数量、电极和电解槽的几何位置排列决定镍氢电池的能量和功率性能（表 4.6）。镍氢电池的功率性能首先在很大程度上取决于电极中的集电极结构，其次，所选的活性物质对其性能也有很大影响，尤其是负极上的活性物质。镍氢电池的寿命取决于所选择的能形成氢化物的合金。

表 4.6 镍氢电池的参数

参数		高能量	高功率
单位能量/(W·h/kg)		70	43
单位功率/(W/kg)		140	1300
能量密度/(W·h/l)		200	90
功率密度/(W/l)		400	2700
循环次数	放电深度 80%	2000	>4000
	放电深度 5%	8000	>20000

近年来，镍氢电池作为可靠和高性能系统已经在汽车领域的高功率应用中得到证实。该电池的应用遍及从混合动力轿车的传动链到为大型客车牵引系统供电的广大范围。在这种情况下，对电池的功率密度、稳定性和安全性的要求都相当高。从电化学角度来看，镍氢电池技术已经相当成熟，其参数不会在今后有显著的改进。目前，开发重点在于电池的成本、大小尺寸和电池管理的优化。为了使镍氢电池在混合动力汽车领域应用更广泛，降低成本和系统优化非常重要。

镍氢电池电极板结构

镍氢电池电极板的排列方式有所不同。大容量电池的电极板通常排列为棱柱形，且单极方向一致。该结构使电极板保持水平状，在工作状态下散热良好。应用于混合动力汽车上的小容量镍氢电池可以采用圆柱卷轴式结构，其优点是便于生产，如图 4.56 所示。

		
	6NR6	6NP7
	圆柱形	棱柱形
空载电压	1.25V	7.5V
容量	5.5A·h	7A·h
单位功率	1160W/kg	1350W/kg
单位能量	44Wh/kg	47Wh/kg
内阻	2.3MΩ	9.8MΩ(1.6MΩ/组)
外形尺寸	32×56mm	285×19.6×109(112)mm
重量	155g	1200g
结构形式	1管/极板	1中央极管/6极板
电池设计	无方向性	垂直位置

图 4.56 圆柱形和带统一气室的棱柱形镍氢电池

镍氢电池在汽车上的应用

混合动力大型客车需要容量大于 20A·h 的电池，而混合动力轿车需要的电池容量小于 10A·h。适用于混合动力轿车的电池既可以是圆柱形，也可以是棱柱形。图 4.57 所示为两款适用于混合动力汽车的高功率电池的样品，分别为圆柱形和棱柱形结构。新型棱柱形镍氢电池模块可以缩小约 20% 的体积。小型棱柱形水平结构的镍氢电池最大的优点在可以满足空间小、散热效率高的要求。

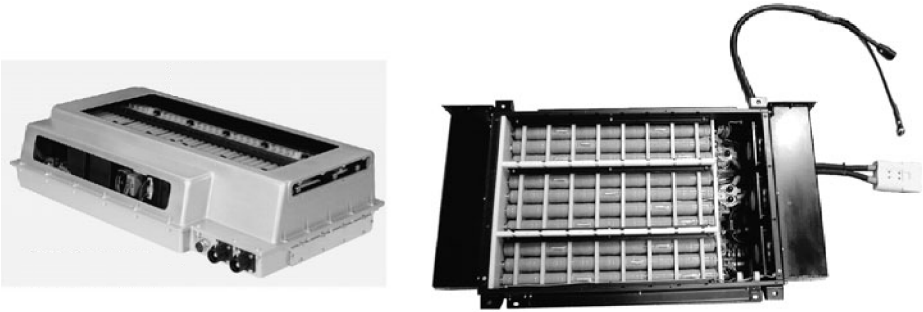


图 4.57 左：36 个棱柱形模块 6NP7（6 芯）组成的镍氢电池
右：30 个 8 芯模块、圆柱形结构的镍氢电池

常规混合动力汽车必须有一定的纯电动续航能力，例如混合动力公交车的高性能电池必须达到能量和功率需求的平衡点。性能好、充电快和寿命长被视为三要素。根据混合动力大巴对能量和电压的要求，必然需要大的电化学储存容量大（25 ~ 60A·h），因此极板的结构只能是棱柱形。

为高电压应用而进行优化的电池管理系统（BMS），其功能在于确保电池不会超出设定的温度和充电范围。除了不间断监控通过传感器传输的电池电压和温度数据以外，电池管理系

统另一个重要的功能是获取电池的状态数据,如充电状态(SOC = State of Charge)、电池健康状态(SOH = State of Health)以及功能状态(SOF = State of Function)。准确监控电池管理系统是延长电池寿命的前提条件。图4.58所示为温度和放电深度对镍氢电池循环寿命的影响。

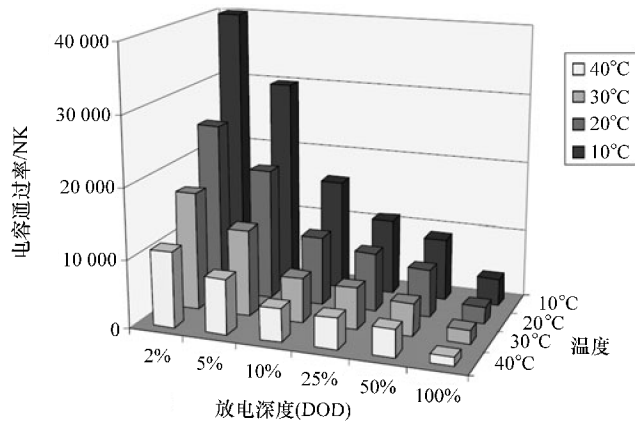


图4.58 温度和放电深度对镍氢电池循环寿命的影响

小结：镍氢电池的普遍特性

- 1) 充放电比功率可达 1300W/kg;
- 2) 无普通电池寿命问题;
- 3) 可以实现高能量通过率 (取决于放电深度);
- 4) 短时间过度充放电时状态稳定;
- 5) 在低温条件下充电性能好 (如, -20°C 时脉冲 10C);
- 6) 被动安全性好;
- 7) 系统质量相对较大;
- 8) 最高能效被限制在 92% (电压滞后)。

4.4.6 锂离子电池

锂离子电池是电池技术发展的最新成果。在成功打入电子产品市场后,锂离子电池必将在汽车领域占据越来越重要的位置。

功能

锂离子电池的基础反应:



锂离子电池正极为嵌入锂离子的金属氧化物 (LiMO_2 或 LiM_2O_4) 或嵌入锂离子的金属磷酸盐 (LiMPO_4) (锂离子嵌入金属氧化物和金属磷酸盐,且不改变金属氧化物的结构),负极的炭材料同样能够吸附锂离子,如图4.59所示。电解质为含锂电解质的有机溶剂。目前,在汽车电池领域的应用中,锂离子电池负极的材料为锂锰氧化物和磷酸铁锂,前者用于能源利用,后者用于高性能应用。在电子产品中使用的锂钴氧化物由于成本和安全性原因不适用于汽车领域。

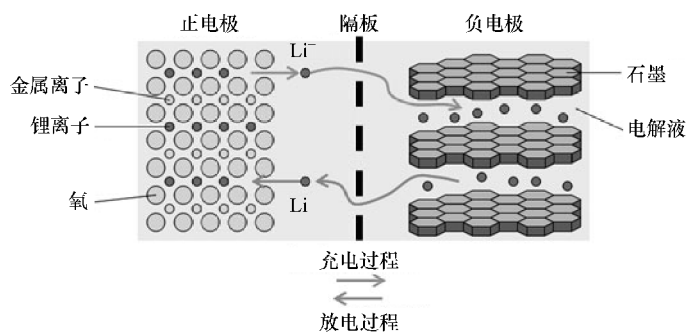


图 4.59 锂离子电池的原理图

锂离子电池电压状况取决于电极材料，其基本参数的范围是：

- 1) 额定电压：3.3(盐酸铁锂离子电池)~3.8V(锰酸锂离子电池)；
- 2) 充电终止电压：3.8(盐酸铁锂离子电池)~4.2V(锰酸锂离子电池)；
- 3) 放电终止电压：2(盐酸铁锂离子电池)~2.7V(锰酸锂离子电池)。

充电状态下的电池电压状况也取决于电极材料。

锂离子电池的结构

由于有机电解质比水状介质的导电性差，锂离子电池极板内的电极必须非常薄。电极薄导致内部惰性成分比例大，结构复杂，成本高（如集电箔）。由于锂离子电池寿命受水和氧的影响最大，所以对极板的密封性要求极高。锂离子电池的首选结构是带螺旋式电极线圈的圆柱形结构，如图 4.60 所示。由于电极的接触面积大，该结构在生产工艺上具有显著的优点。每一个电解槽都与一个冷却和电池管理系统模块相连。与圆柱形结构相比，棱柱形结构的最大优势在于可以更好地利用空间。

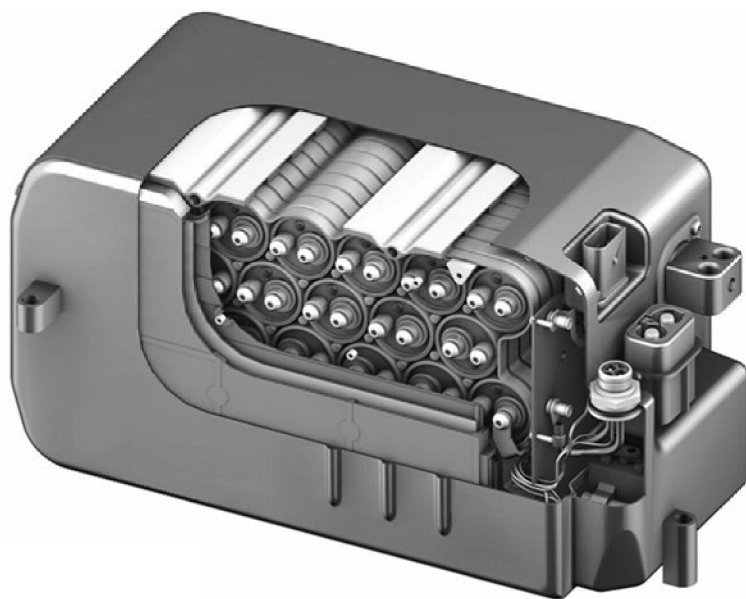


图 4.60 戴姆勒公司的锂离子电池模块

锂离子电池参数见表 4.7。

表 4.7 锂离子电池参数

参数		高能量	高功率
单位能量/(W·h/kg)		100	70
单位功率/(W/kg)		200	>2000
能量密度/(W·h/l)		250	150
功率密度/(W/l)		500	>4200
循环次数	放电深度 80%	>2000	>2500
	放电深度 5%	未知	>25 000

最初定位为纯高能量电池系统的锂离子电池已经有长足的发展，成为一个可以涵盖广泛能源和功率需求区间的系统。

锂离子电池的首要优点是单极电压高，因此可以在电池组中适当减少电解池数量。而在上述电池组中，每一个电极板的电压都必须稳定地保持在 2.5~4.2V。因此，需要一个可靠性高的电池管理系统。

近年来，通过不断开发新的活性和惰性电极材料以及改进生产技术，锂离子电池的寿命大大延长，如图 4.61 所示。如今，应用在汽车领域的锂离子电池寿命已经超过 10 年。新的目标是将其寿命延长至 15 年，从而达到混合动力汽车对电池在能量通过率的要求。

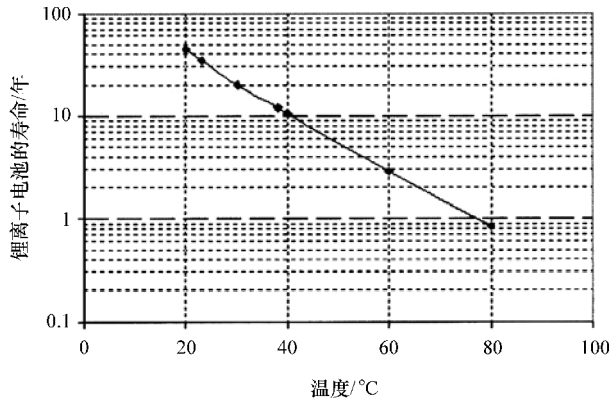


图 4.61 锂离子电池不同温度下的寿命曲线

锂离子电池系统

锂离子电池对系统工程的要求较高。尤其是锂离子电池在使用不当时，如过度充放电或短路的情况下，可能出现危险性，因此电池管理系统的可靠性至关重要。镍氢电池模块在过度充放电时存在一定的公差范围，因此可以监控多个模组，锂离子电池与镍氢电池模块不同之处在于，必须分别对锂离子电池组的每一个极板进行监控。每个电极板不同的充电状态须由一个活跃的充电状态管理系统进行调节，使电解槽保持最佳充电状态。为了在长时间工作中散热，锂离子电池需要有效的冷却系统，使每个电解槽都保持在同等温度水平。图 4.62 为锂离子电池的结构示意图。

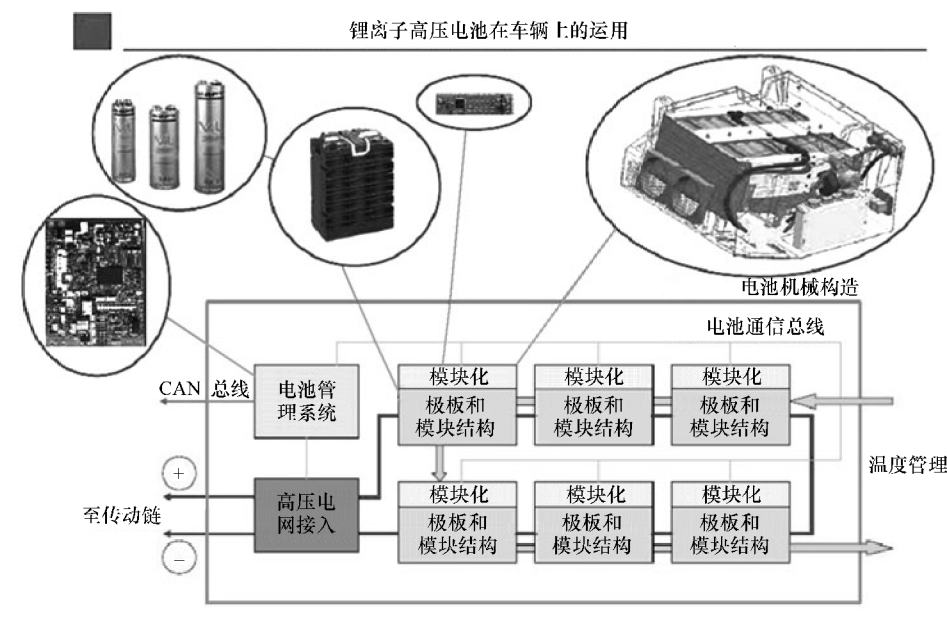


图 4.62 锂离子电池的结构示意图

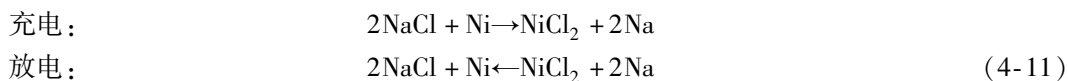
整体特性

锂离子电池的特点总结如下：

- 1) 充放电比功率可达 3000W/kg (电解槽层面上)；
- 2) 能量密度可达 $6000\text{W} \cdot \text{h/kg}$ (电解槽层面上)；
- 3) 可实现高能量通过率 (取决于放电深度)；
- 4) 电极电压高，因此可相对减少电解槽数量；
- 5) 接近 100% 的充电率；
- 6) 耐久性能非常好 (使用寿命和循环寿命)；
- 7) 对过度充放电反应灵活；
- 8) 每个电解槽都需要进行监控。

4.4.7 Zebra 电池

Zebra 为 Zeolite Battery Research Africa Project 的缩写，含义为一种零排放无污染的绿色电池，即钠-氯化镍电池，它属于高温电池，其工作温度高，为 $270 \sim 350^\circ\text{C}$ 。该电池的反应物为氯化钠和镍。允许钠离子通过的陶瓷电解质将带钠和带氯化钠/氯化镍/镍的两个电极分开。钠-氯化镍电池电解槽内的反应为

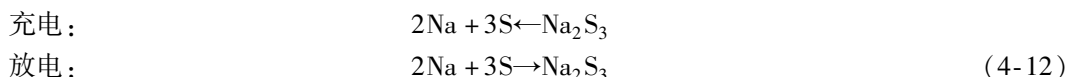


其空载电压约为 2.58V ，高于大部分动力电池。相对较大的参数还有：理论能量密度 $788\text{W} \cdot \text{h/kg}$ 和实际最大能量密度 $100 \sim 120\text{W} \cdot \text{h/kg}$ 。其电极具有极高电容量效率 (约 100%)，然而其最大比功率只有约 180W/kg 。

钠-氯化镍电池的优势在于其坚固性、寿命长以及成本较低；其弱点在于工作温度高以及热损失造成自放电。因此该电池目前只应用在电动汽车上，而不太适合应用在混合动力汽车上。

4.4.8 钠硫电池

钠硫电池跟钠-氯化镍电池一样，同为高温电池，其工作温度为 290 ~ 390℃。与钠-氯化镍电池的不同之处在于，在这一温度下该电池的电极是液体：负极为熔化的钠，正极浸渍过硫酸的石墨织物。电解质为含钠的氧化铝。钠是一种会与水产生剧烈反应的碱金属，处理不当会对环境造成不良影响。钠硫电池电解槽内的反应为



为确保有足够的能量，电极的熔化温度必须较高。钠硫电池的优点在于不存在电化学生自放电。开路电压根据充电状态在 1.78 ~ 2.08V。其比能量和比功率与钠-氯化镍电池相似。由于工作温度过高，同样不太适合应用在混合动力汽车上。

4.4.9 超级电容

电容器是用于存储电荷的电子元件。一个电容器由两个相互隔绝的具有导电性的板状材料构成，例如金属板/箔。绝缘体采用气隙或合成绝缘材料。电容器的电容作为计量其可充电的计量单位，其计算方式见式 (4-13)

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (4-13)$$

式中 C ——电容器电容 (F)；

ϵ_0 ——真空的介电常数， $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}$ ；

ϵ_r ——绝缘材料的相对介电常数；

A ——金属箔面积 (m^2)；

d ——绝缘材料厚度 (m)。

常规电容器要达到高电容，需要大的介电常数值， $\epsilon = 6500 \sim 10\,000$ ，金属板/箔面积大，电极之间距离小（电解质层厚度几微米即可）。典型的放电时间常数在 100ms 范围内。放电时间常数为比能量和比功率之商。它是彻底放电所需平均时间的计量单位。发展所谓的双电层电容器（超级电容器）显著提高了电容器的蓄电能力。

双电层电容器的原理早在 1856 年就由物理学家亥姆霍茨发表：将电压施加到浸在导电溶液里的电极上，从而形成双电层。因此该电容器也称为电化学生双电层式电容器。在未充电状态下，电荷载体（离子）均匀分布在两个电极周围的导电溶液即电解液中。施加电压后，电解液中的负电子流向正极，正电子流向负极，如图 4.63 所示。极化的电解液存储静电电能。

虽然电容器属于电化学生元件，但其电能储存方式无化学反应产生。与普通电解电容器相比，超级电容的电容容量剧增有如下两个原因：

1) 采用只传导离子不传递电子的特殊电解材料代替不导电的电解质，如图 4.63 所示。离子导体和电子导体的交界处无电荷交换。因此电荷聚集在交界处两侧（在离子导体中以

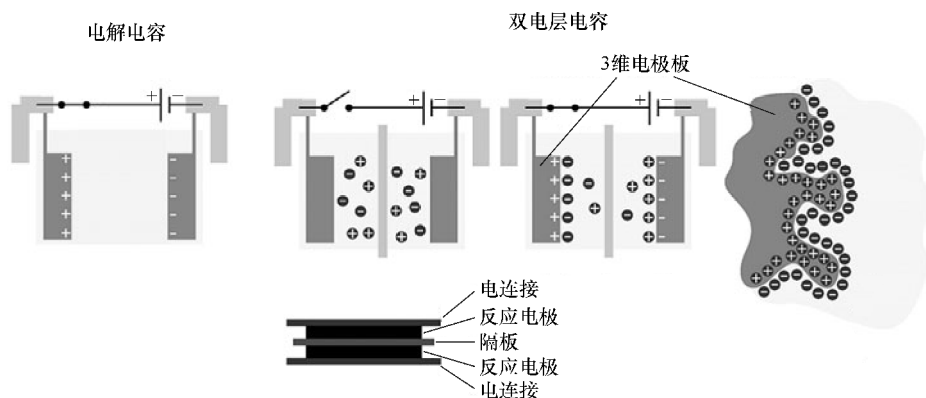


图 4.63 双电层电容与电解电容的对比简图

离子形式存在，在电子导体中以电子形态存在)，形成极薄镀层。决定电容的因素不是离子导体的厚度，而充电层的厚度，通常为 1nm 左右。

2) 另一个重要因素是，采用多孔炭材料作为电极大大拓展了有效反应面积。现有的多孔表面材料可达 $3000\text{m}^2/\text{g}$ ，比电容为 $500\text{F}/\text{g}$ 。

与蓄电池相比，超级电容的内阻相当小，仅为 $0.29 \sim 2.8\text{M}\Omega$ ，因此放电快（功率密度高）。从图 4.64 中明显得出，温度变化不仅几乎对电容没有影响，对内阻也几乎不产生影响，因此超级电容具有强电流能力。此外，生产商 Maxwell 技术公司声称其公司生产的超级电容使用寿命可达 10 年，可循环使用 100 万次。

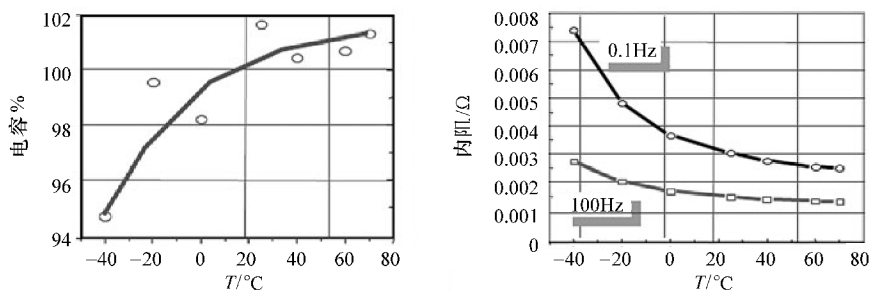


图 4.64 超级电容的电容和内阻分别与温度的关系

工作温度过高是导致动力电池老化的主要因素。因此超级电容与其他动力电池一样需要进行冷却，以保证其工作时不超过规定温度。

超级电容的一大缺点是额定电压只有 $2.3 \sim 2.7\text{V}$ 。一旦超过额定电压将加速其老化，造成电解质电化学分解，从而形成气泡导致电容器损坏。多个电解槽并排可以提高电压。目前实现了双极电极为基础的“三明治”结构，使一个电极板的正极与相邻电极板的负极相连，实现低内阻，因此无需采用其他材料连接电极板和电极。该电极板结构尚处于研发阶段。与电解电容器相比，超级电容电解槽常见结构为圆柱卷轴式，如图 4.65 所示。

与其他动力电池不同的是，超级电容充放电过程中，电压会发生变化，如图 4.66 所示。因此，超级电容无法直接用于车载直流电网，必须通过直流调节器调节电压后相适应。

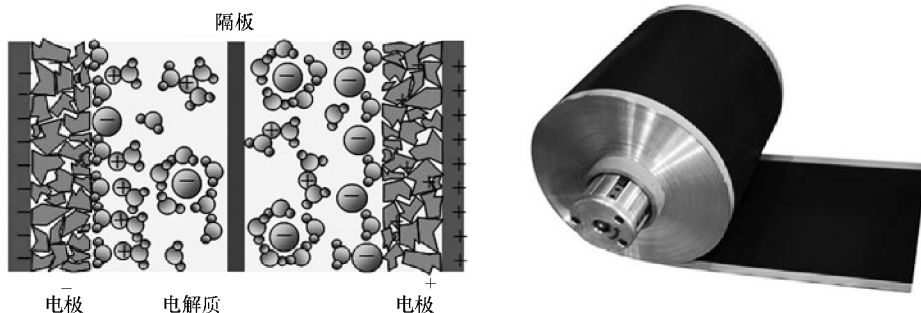


图 4.65 卷轴式超级电容

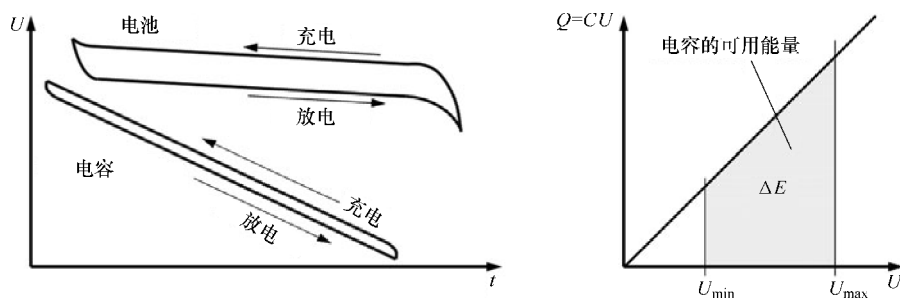


图 4.66 电池、超级电容在充放电时的电压变化图

该直流调节器通常只适用于一定的电压范围。应测量最大电压，以充分利用电容器的电压。通过式 (4-14)，得出超级电容实际能量缓冲能力为

$$\Delta E = \frac{1}{2} C (U_{\max}^2 - U_{\min}^2) \quad (4-14)$$

式中 ΔE ——电容器可用内能范围 (J)；

C ——电容器电容 (F)；

$U_{\max}$ ——电容器最大电压 (V)；

$U_{\min}$ ——电容器最低工作电压 (V)。

例如，当最低工作电压为最大电压的 50% 时，理论上内能的使用率为 75%。

目前 Maxwell 技术公司生产的 MC Power 系列电容器的比能量密度超过 $5 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ ，最大功率密度达 $13 \sim 17 \text{ kW/kg}$ 。图 4.67 所示为超级电容单体和模块结构。

超级电容作为高效蓄能器凭借短时间达到功率峰值优势获得越来越重要的地位。与其他动力电池相比，超级电容性能好，使用寿命长。在混合动力汽车领域，可以满足如起动、突然加速和制动能回收等高功率需求。因此，超级电容通常应用于市内公交车，适合频繁起步停车，参见本书第 7 章。同时还提到车载电网的稳定性，以及短时间在汽车领域最常见的应用实例。

各研发部门的目的首先是提高超级电容的能量密度，通过使用新型材料和扩大表面积，可将系数提高到 10。其次是降低内阻，从而提高电流强度。这样一来，超级电容可以成为锂离子电池的理想补充，两者的结合可以满足混合动力汽车对高功率的要求。



图 4.67 超级电容的单体和模块结构

4.4.10 飞轮蓄能器

飞轮蓄能器的工作原理是通过旋转质量惯性矩储存动能。储存或释放动能分别表现为转子的加速或减速。通过变速器或大多数情况下通过电机系统实现能量的输入和输出，因此只有转速快、效率高的电机适用。要说明的是，电机在低储存和释放功率时效率低。因为飞轮有最高转速限制，同时减速是不会从工作状态变为完全静止，所以其可储存的能量可以根据式(4-15)得出：

$$E = \frac{1}{2}J(\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2) \quad (4-15)$$

式中 J ——旋转质量的惯性矩 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)；

$\omega_{\max}$ ——转子最高角速度 (rad/s)；

$\omega_{\min}$ ——转子最低角速度 (rad/s)；

n ——转速 (r/min)。

可以储存于飞轮的能量既与惯性呈线性关系，同时与转速成二次函数关系，所以飞轮蓄能器的转速普遍非常快。离心力负荷与转子的坚固性两个参数紧密相关。转子直径越大，则惯性矩越大，离心力也越大，因此需要降低转速。

单位质量的可存储的最大能量被称为飞轮的比能量密度。其大小取决于所用材料的抗拉强度、密度和几何形状。高比能量密度可以通过高抗拉强度和低密度实现。章节 4.4.12 “各种蓄能系统的比较”将对各种蓄能系统的能量和功率密度。

早期，大多数飞轮使用钢制转子，所以质量大。目前，其发展方向是轻型的纤维复合材料。这类纤维复合材料抗拉性强，转速快，因此可储存的能量密度大。转子壳体通常抽真空，以减少摩擦。其重要性在于，在转子损坏的情况下，所储存的能量可以在壳体内消散，而不会渗透至外部。飞轮的轴承采用陶瓷及永磁体轴承或电磁轴承。此外，采取适当措施，

以确保在储存和释放过程中的反作用力以及车辆行驶过程中的偏差力相互平衡。

由于飞轮蓄能器比能量低且事故中危险系数大，因此未能在汽车领域广泛应用，但飞轮蓄能系统完全有希望在特殊领域里满足特殊的需求，如一级方程式赛车，2009 赛季规则允许使用动能回收系统（KERS）作为蓄能系统，该系统可以回收制动动能，并用于下一次加速。一级方程式赛车所采用的动能回收系统要求短时间大量充放电，通过方程式赛车赛道中弯道减速和加速实现，以及预期最大加速性能。纯机械飞轮系统 DYNASTORE 是 Flybrid 系统、XTRAC 和 Torotrak 为一级方程式赛车联合开发的。该系统由离合器，CVT 变速器和一个重 5kg、转子转速为 64 500 ~ 32 250r/min，转子在真空结构中旋转的飞轮构成。该系统中中间储存的能量为 400kJ/r，以每转最大输出功率 60kW × 6.67s（相当于 400kJ）。图 4.68 所示为带飞轮的 CVT 变速器工作原理图和外观视图。

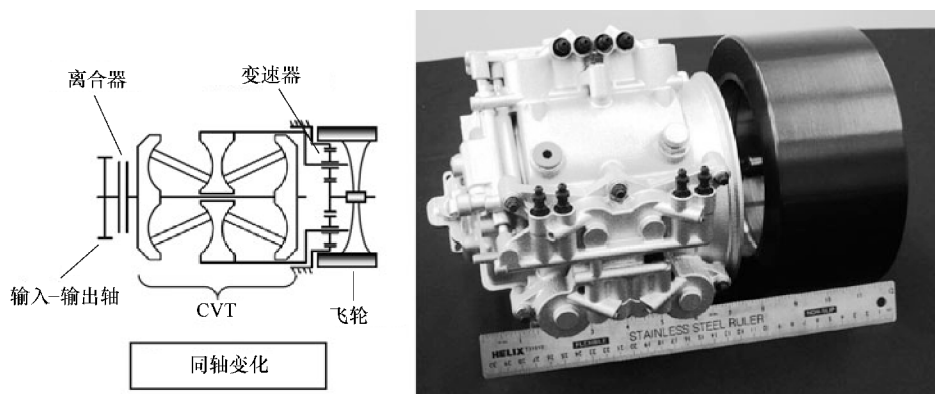


图 4.68 一级方程式赛车上的动能回收系统原理图

除了纯机械的飞轮蓄能器外，德国 Compact Dynamics 公司还开发出一套机电系统。该系统由 2 个或 4 个电机 - 飞轮单元组成，如图 4.69 所示。



图 4.69 带功率电子装置的 DYNASTORE 品牌的四飞轮蓄能器

每两个飞轮运行方向相反，因此在能量输入和输出以及将车辆偏差力的反作用相抵消。电机的转子同时作为飞轮蓄能，如图 4.70 所示。功能如内转子磁阻电机，参见章节 4.2.7。该设计除了特别适用于转子转速高的飞轮蓄能器，其优点在于转子在未通电状态下旋转时不

产生转矩和磁滞损耗（铁损）。转子选择的材料必须具有高抗拉强度，同时具有良好的弱磁特性。因此，一方面转子高速旋转时的离心力保持不变，并且磁滞损耗低。

除了比功率高这一优点以外，飞轮蓄能器的最高工作温度明显大于镍氢电池、锂离子电池和超级电容，从而更容易散热，这一明显优势尤其适用于赛车。

为了减少气体摩擦损失，在壳体内部的气体压力要降低，从而也实现了转子的高效散热。为了确保内部转动的转子充分冷却，需要安装一个蒸发冷却系统。冷却剂在转子的空腔形成一个冷却层。当转子温度高时，液体蒸发，蒸汽在水冷式冷凝器又被液化，从而形成一个封闭的热管循环。

整流器位于飞轮壳体上，使之与电机短暂接触。除了管理蓄能器蓄能以外，该整流器还具备监控车载电路电压并保持电压稳定的功能。

在 DYNASTORE 蓄能器的研发过程中，特别注重其安全性，尤其是在失效故障或发生事故的情况下。因此转子须由金属片制成，以确保故障时转子没有大的碎片脱落，在此定子也作为一个辅助性防护板。此外，在发生事故或车载电网短路的情况下，该蓄能器将系统化释放能量，即所储存的能量在电动机线圈中转化为热能。

该蓄能器的特点是具有很高的蓄能功率、循环强度好、耐热，以及老化速度慢。除了应用于赛车，Compact Dynamics 公司也在寻求混合动力汽车的解决方案，使飞轮蓄能器与常规负荷电池相结合，从而满足混合动力汽车对功率峰值的要求。

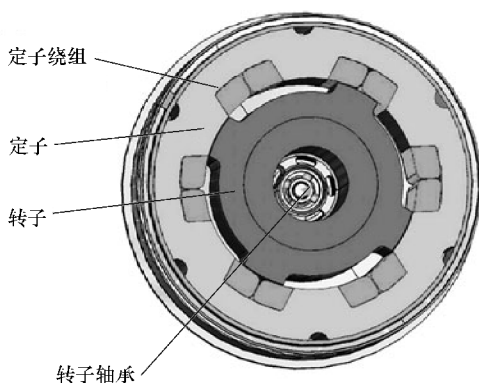


图 4.70 飞轮蓄能器的单体图

4.4.11 液压气动蓄能器

液压蓄能器同样可以储存能量。液体通过一个可逆的液压器在不同压力下的两个储存容器之间进行交换，从而改变能量状态。蓄能器蓄能时，如回收制动能，液压油被泵入预先受力的高压容器中，从而压缩容器中的气体（液压气动蓄能器如图 4.71 所示）。

释放能量时，液压油通过在此处作为涡轮工作的液压装置，流向低压蓄能器，并把能量输出到传动系，见图 4.72。

液压系统中通常使用氮气，因为氮气与液压油不产生化学反应。两种物质通过一个灵活的挡板隔开。根据挡板的种类不同，液压气动蓄能器又分为囊式、活塞式和隔膜式蓄能器，如图 4.73 所示。

囊式蓄能器

囊式蓄能器通常由高强度钢材的压力罐、用于分离介质的弹性气囊、气阀、液压链接器及单向阀。气囊周围的液压腔作为工作腔与液压回路相连，这样一来，增压时，液压油填入蓄能器内，气体被压缩。降压时，气囊膨胀将腔内的液压油压入液压回路。

为了避免气囊撞击气阀，气囊膨胀时腔体内应剩余约占额定容量 10% 的液压油。囊式

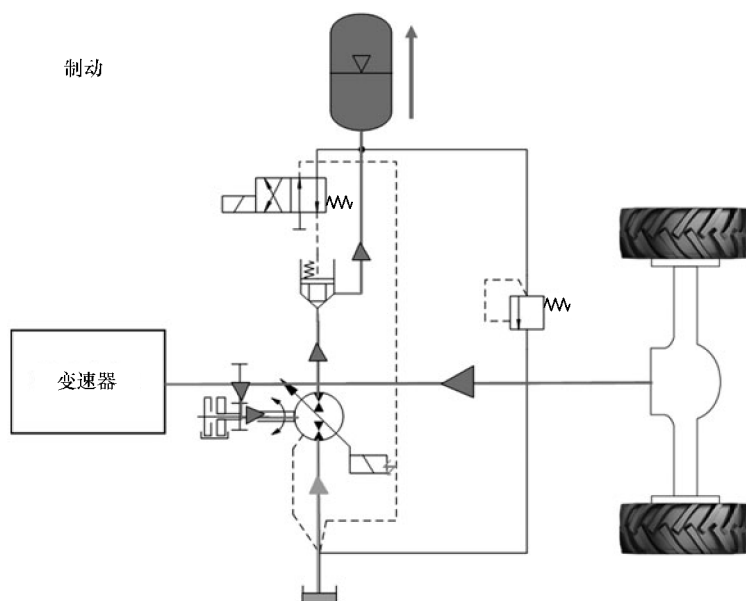


图 4.71 制动中的液压气动蓄能器蓄能过程

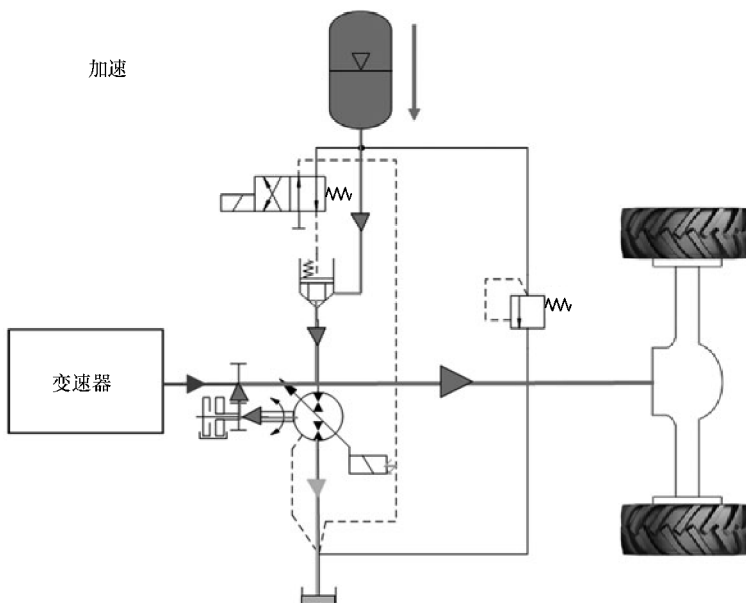


图 4.72 加速过程中的液压气动蓄能器释放能量过程

蓄能器容积利用率 $v_{k,\max}$ （有效容积 $\Delta V = V_2 - V_1$ 与最低工作压强 p_1 时的气体容积 V_1 之比）为 0.6 ~ 0.75，低于活塞式蓄能器，最小压力比（充气压力 p_0 与最大工作压力 p_2 或安全阀调定压力 p_3 之比）不小于 1:4。当压力比小于 1:4 时，由于弹性气囊往复次数过多，热应力增大，导致蓄能器使用寿命降低。囊式蓄能器的额定容积为 0.2 ~ 200L，允许工作压力可达 550bar（1bar = 10^5 Pa）。与活塞式蓄能器不同的是，囊式蓄能器的扩散损耗小，其原因是气囊在充气时形成一个封闭的腔体，使气体与外部隔绝。

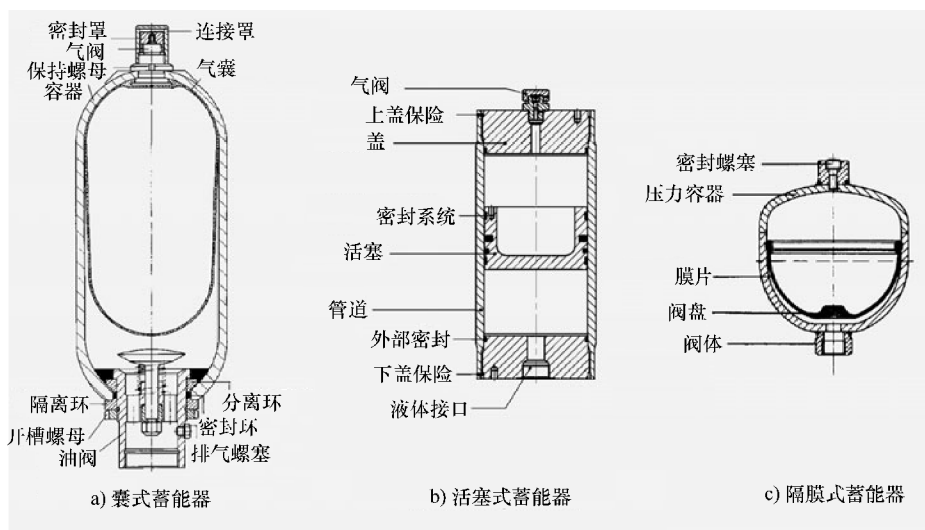


图 4.73 液压气动蓄能器的结构形式

囊式蓄能器应用在汽车领域，例如作为制动能回收装置，倾向于采用复合结构（带金属内衬的高效纤维复合材料的）压力罐。

活塞式蓄能器

活塞式蓄能器缸筒中自由运动的活塞将两种介质分开。活塞式蓄能器适用于额定容积为 1 ~ 250L，最大工作压力为 350bar，可压缩气体体积最高达 1500L。由于活塞的活动范围为整个缸筒，因此 90% 压力腔都可以作为液压腔，且导致充气压力 p_0 与最大工作压力 p_2 出现极端的比值。由此可得出容积利用率 $v_{k,max}$ 高（0.85 ~ 0.9），最小压力比 p_0/p_2 小（1:10 到 1:12）。此外，活塞式蓄能器也适合于大体积流量和高功率。

活塞式蓄能器的弱点在于活塞与缸筒内壁产生摩擦，使两种介质之间产生压差，以及该系统必然出现的漏损。

隔膜式蓄能器

隔膜式蓄能器由弹性隔膜将两种介质分开。该隔膜的材质与囊式蓄能器中的气囊材质相似。隔膜底部有一个阀盘，使液压油排出时液压出口封闭。隔膜式蓄能器的结构大致分为两类：一类是焊接式，其隔膜不可更换，焊接环硫化；另一类是螺纹式，边缘加厚设计。焊接式蓄能器的允许工作超压为 330bar，螺纹式为 700bar。

与囊式蓄能器一样，液压油排出时隔膜式蓄能器内应剩余占额定容量 10% 的液压油。隔膜式蓄能器容积利用率 $v_{k,max}$ 在 0.8 ~ 0.85 之间，同样低于活塞式蓄能器。焊接式的最小压力比 p_0/p_2 为 1:4 至 1:6，螺纹式为 1:10，由此可见隔膜式蓄能器的最小压力比小于囊式蓄能器，其原因在于隔膜不能承受破坏性。

设计及参数

液压气动蓄能器的工作性能首先由蓄能器内的气体决定。气室可被看作封闭的热力学系

统，其能量可以作为热或功输入或输出。根据热力学定律对气体状态改变进行描述。气体的状态取决于压力、容积以及温度。理想气体的状态方程式为

$$pV = mRT \quad (4-16)$$

式中 p ——压力 (N/m^2)；
 V ——容积 (m^3)；
 m ——质量 (kg)；
 R ——气体常数 ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$)；
 T ——绝对温度 (K)。

在液压蓄能器中，理想气体的状态根据式 (4-17) 通过多变曲线来描述不同的工作阶段 (0 - 预充气, 1 - 充气开始, 2 - 充气结束)，图 4.74 为一个完整的工作循环进程，包括状态曲线和参数。

$$p_0 V_0^n = p_1 V_1^n = p_2 V_2^n = \text{恒定} \quad (4-17)$$

式中， n 为多变指数。

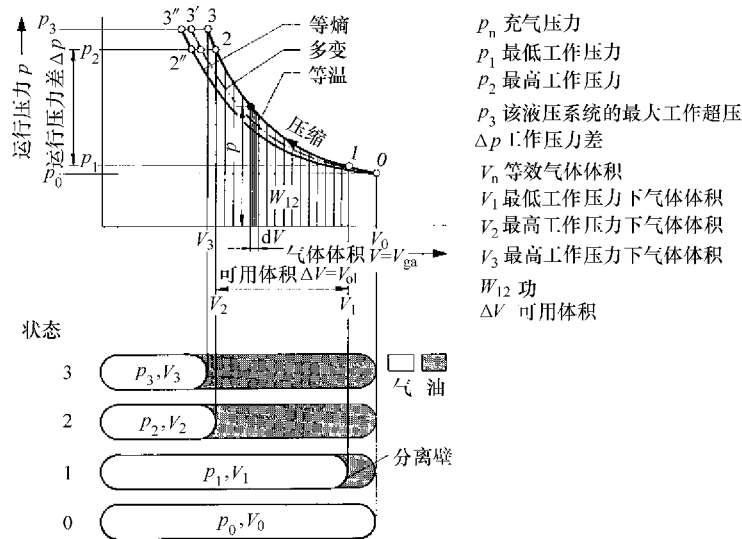


图 4.74 液压气动蓄能器的状态曲线 (p — V 曲线)

在进气和排气过程中，液压蓄能器的多向状态变化由热交换决定，因此也由状态变化进程的速度决定。慢速进程中 (时间 $> 3\text{min}$)，气体和周围环境有足够的时间进行完整的热交换，这样一来温度几乎保持稳定 (等温状态变化, $n = 1$)。

快速进程中 (时间 $< 1\text{min}$)，气体几乎不与周围环境发生热交换，在此假设为一个近似等熵状态变化 $n = \kappa$ 。在实际操作中，根据进程速度和热交换情况，多变指数 n 在 1 和 κ 之间 ($\kappa = 1.4$ 时指氮气)。

图 4.74 和图 4.75 分别为一个完整的工作循环进程包括状态曲线和各种参数。

状态及状态变化

0 为液压蓄能器预充气状态 (充气压力 p_0)。典型的预充压力: $p_0 = 0.9p_1$ 。

1 为充气开始。

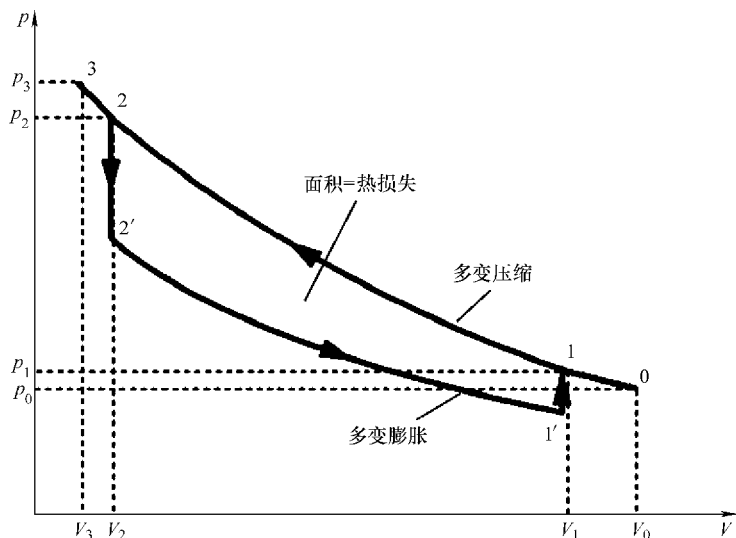


图 4.75 液压气动存储器的工作循环 ($p-V$ 曲线)

1→2 为液压蓄能器充入的气体由于被压缩, 气压和温度升高 (多变压缩)。

2→1 为充气结束。

2→2' 为恢复期: 气体将热量传给周围 (液压油和蓄能器壳体), 压力降低, 容积不变 (等容散热)。

2'→1' 为排气过程中, 气体膨胀, 气压和温度降低 (多变膨胀)。

1'→1 为恢复期: 气压通过吸收周围的热量升高 (等容吸热)。

3 为最大工作压力状态 (安全阀打开)。

图 4.75 中, 1-2-2'-1'-1 范围内为进气和排气的热损失。压缩越快, 绝热性越好; 恢复期越短, 散热时间越短。由此可得出热损失小。如果气体在压缩时和恢复期散热, 那么在气体膨胀时 1' 到 2' 通过从周围吸热, 使热损失降低。

充气和排气中, 容积变化做功得出施加的或已完成的做功

$$W_{12} = - \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (4-18)$$

蓄能器容量 W_{12} 取决于状态变化的方式以及状态参数大小 V_1 、 p_1 和 p_2 。蓄能器大小及承载能力取决于最大容量 V_1 和最大压力 p_2 。预充压力 p_0 通过 p_1 对能量交换产生额外影响。蓄能所用有效容积 ΔV ($\Delta V = V_2 - V_1$) 在等温状态变化中表示为

$$\Delta V = V_0 \left(\frac{p_0}{p_1} - \frac{p_0}{p_2} \right) \quad (4-19)$$

在等容状态变化中表示为

$$\Delta V = V_0 \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} - \left(\frac{p_0}{p_2} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (4-20)$$

将能量容量最大化的极限值取决于最佳压力比 p_1/p_2 与所属的容积因素 ν_κ ($\nu_\kappa = \Delta V/V_1$); 在等温状态变化中表示为

$$(p_1/p_2) = (1/e) = 0.368; \quad \nu_\kappa = 0.632 \quad (4-21)$$

在等容状态变化中表示为

$$(p_1/p_2) = \kappa^{\frac{1}{1-\kappa}} = 0.308; \quad \nu_{\kappa} = 0.569 \quad (4-22)$$

在此以氮气最大能量容量

$$\text{等温:} \quad W_{12\max} = 0.368 p_2 V_1 \quad (4-23)$$

$$\text{等容:} \quad W_{12\max} = 0.308 p_2 V_1 \quad (4-24)$$

由于在高压（>200bar）、低温（<230K）情况下，实际填充的气体与理想气体差距过大，因此准确计算需用到温度和压力相关的等容系数或校正因素。蓄能的准确计算尤其是循环过程，可采用模拟模型来完成。

液压气动蓄能器的热损失用蓄能效率 η_{ga} 表示，即排气与进气做功之比

$$\eta_{\text{ga}} = -W_{21}/W_{12} \quad (4-25)$$

该效率与气体流动的特点（即循环特点）和循环频率有关。循环频率高，散热少，蓄能效率就高。图 4.76 所示为一台活塞式蓄能器在循环工作中与其蓄能效率相关的循环特点和循环频率。

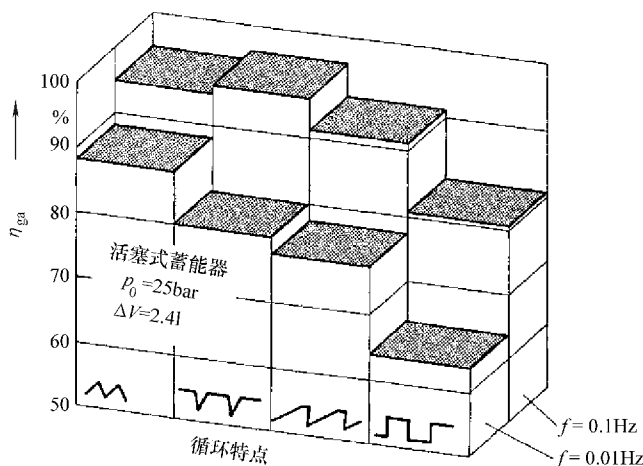


图 4.76 在作用变量影响下活塞式蓄能器在循环过程中的存储效率

流体静力传动

将液压气动蓄能器整合到流体静力传动系统中较为容易，因为这种情况下在发动机驱动的流体泵和对轴进行驱动的液压马达之间已经存在一个闭合液压循环，如图 4.77 所示。与机械变速器相比，流体静力传动（流体静力变速器）的优势在于其分散的结构使转矩/转速达到无级变化，更确切地说，从车辆静止状态起的速度变化（ $i_A = \infty$ ）以及宽广的速度变化范围，特别是在流体泵/马达的顺序调节中（ i 可达到 15）。

作为流体泵及液压马达，斜盘式与斜轴式结构较为常见，如图 4.78、图 4.79 所示。两种结构都根据柱塞位移改变容积原理工作。

柱塞移动使液压缸填满或排空。斜盘式轴向柱塞泵中，活塞通过不旋转的斜盘和旋转的液压缸体（柱塞筒）做往复运动，如图 4.78 所示。输入或输出动力通过驱动轴完成，驱动轴通过一个齿条与液压缸体连接。进气和排气（换向机构）通过平面或球面控制盘及两个

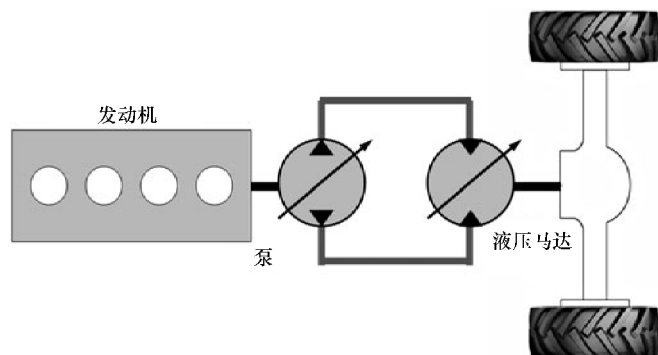


图 4.77 静压驱动行驶

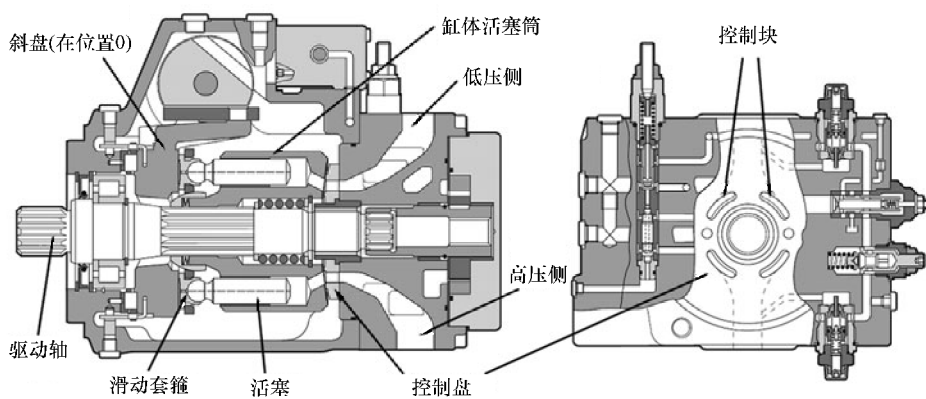


图 4.78 斜盘液压泵

肾形控制节流孔控制。两个控制节流孔分为一个进液孔和一个排液孔，并连接到液压缸的中部（无阀配气）。除换向机构以外，平面式控制盘也具备轴向轴承的功能，在球形工作面具备径向轴承的功能，带动柱塞筒。输入或输出转速与液压油的容积流量成正比。传递转矩取决于压差。伺服流体泵或伺服发动机可通过回转角的变化改变液压油流量，从而改变体积流量。

斜轴式轴向柱塞泵的工作模式与斜盘式轴向柱塞泵类似，不同之处在于其转矩通过驱动盘传递，如图 4.79 所示。驱动盘和液压缸体以同样的角速度旋转，通过调节的回转角使柱塞在旋转中产生振动行程。与斜盘式轴向柱塞泵相比，斜轴式轴向柱塞泵允许更大的伺服角，且在转速低的时候效率较高，但成本较高。

无损驱动的液压参数

液压油的几何流量是通过几何学计算出的各液压室容积总和。该总和通过柱塞在一个运动周期（轴旋转）中的运动来计算，此处不考虑公差、间隙和形变（德国工业标准 DIN ISO 4391）。

斜盘式轴向柱塞泵的几何排量为

$$V_g = zAh = zAD_{K,z}\tan\alpha \quad (4-26)$$

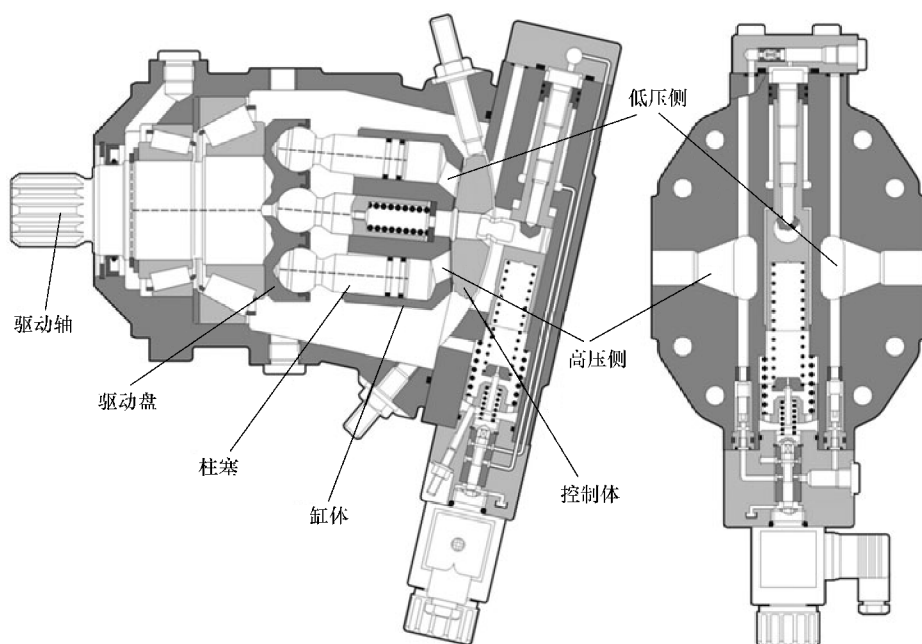


图 4.79 斜轴泵

斜轴式轴向柱塞泵的几何排量为

$$V_g = zAh = zAD_{K,H}\sin\alpha \quad (4-27)$$

由几何排量和驱动装置转速 n 得出理论流量的液压参数为

$$q_{V_g} = 10^{-6} V_g n \quad (4-28)$$

在忽略损失的前提下，柱塞做功沿轴旋转的转向角所产生的驱动能相等，由此可计算出流体泵转矩的理论值为

$$M_g = 10^{-4} V_g \Delta p / (2\pi) \quad (4-29)$$

式中 V_g ——几何排量 (mm^3)；

z ——柱塞数量；

A ——柱塞面积 (mm^2)；

$D_{K,Z}$ ——柱塞筒节圆直径 (mm)；

$D_{K,H}$ ——驱动法兰部分节圆直径 (mm)；

h ——柱塞行程 (mm)；

D_K ——柱塞直径 (mm)；

α ——摆动角 ($^\circ$)；

q_{V_g} ——理论流量 (L/min)；

n ——转速 (r/min)；

Δp ——压差 (bar)；

M_g ——理论流体泵转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$)。

液压混合驱动轿车由 Innas 和德国亚琛工业大学共同研发，如图 4.80 所示。串联式液压

混合驱动系统与串联式电动混合动力总成在基本结构上一致。该系统所实现的四轮驱动可调节前桥与后桥传动比，且四轮均可回收制动能。与常规串联式混合动力汽车发动机工作状态相似，只在电池低于一定的充电状态才开始工作，在此，发动机工作的目的是使 20L 的高压蓄能器保持一定的压力。发动机工作范围可使车辆在起动时具有高效率，这种方式避免了部分负荷比例过大。当蓄能器无需蓄能时，发动机会自动停止，以避免出现空转损耗。

轮毂电机必须覆盖高转速和大转矩范围，在车辆在低速行驶和起动转矩大时减小摩擦损耗并保持平衡。传统的液压装置无法满足上述要求。新型液压原理（即“浮杯”原理）符合上述要求，如图 4.81 所示。该液压泵带 24 个轴向柱塞，其作用在于对称减小轴承负荷。在该结构中，液压转换成转矩的效率相当高，反向转换效率同样高。

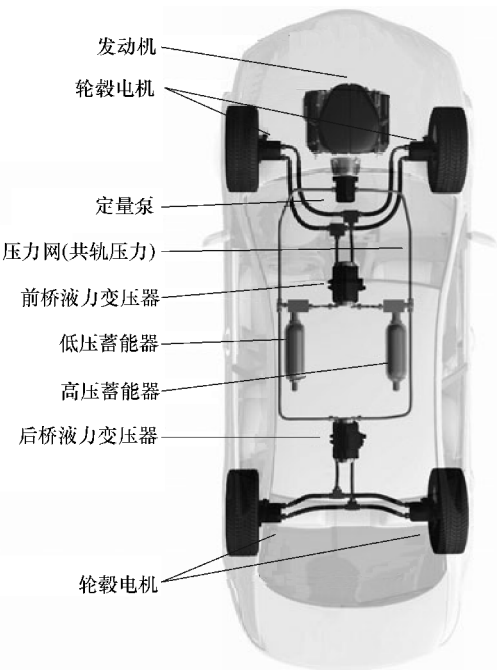


图 4.80 液压混合动力轿车传动链

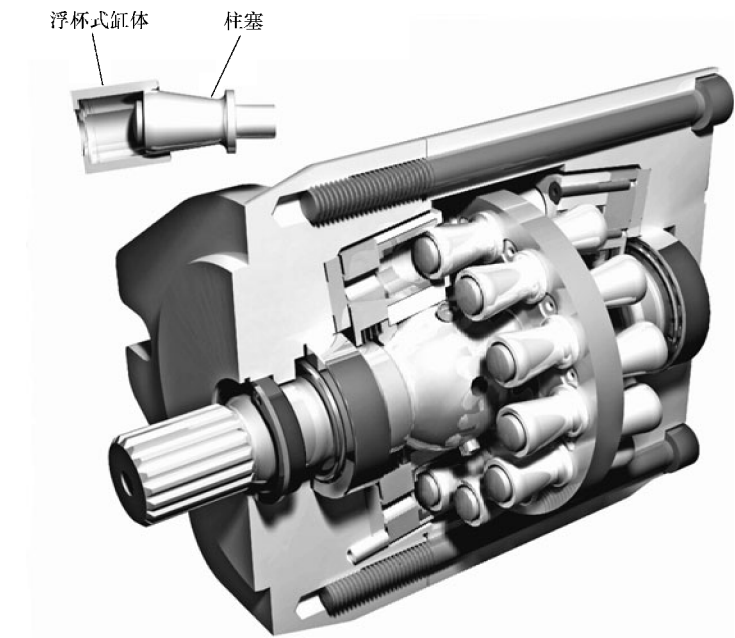


图 4.81 恒定的浮杯式单元剖视图

图 4.82 所示为三种不同液压柱塞泵在转速接近“0”时所测得的转矩（接近于最大理论值）。“浮杯式”轴向柱塞泵凭借其 24 个活塞在保持高效的同时转矩输出高度一致。

高压蓄能器内的压力水平随其蓄能状态而定，且不同蓄能状态下其压力明显不同，其所需的压力是为了向车轮输出所需的转矩。回收制动能时或发动机－泵－单元工作时，压力升高。图 4.83 为美国 FTP 测试循环中压力变化过程，正压差表示车辆驱动模式，负压差表示制动。在模拟测试中，车辆采用双轮毂电动机驱动。

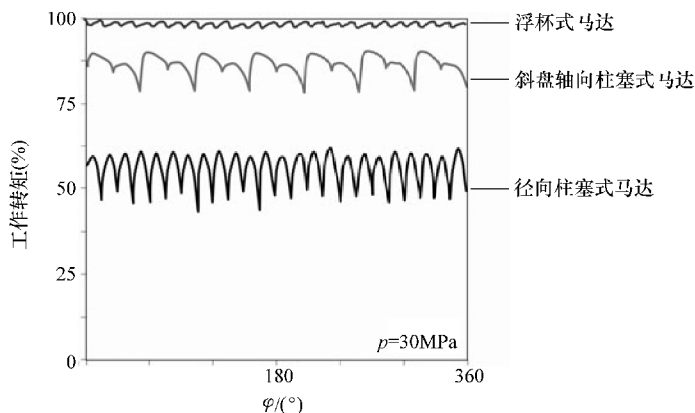


图 4.82 三种不同的液压马达在最大理论转矩下的输出转矩（压力 300bar 和 $n < 1\text{r/min}$ ）

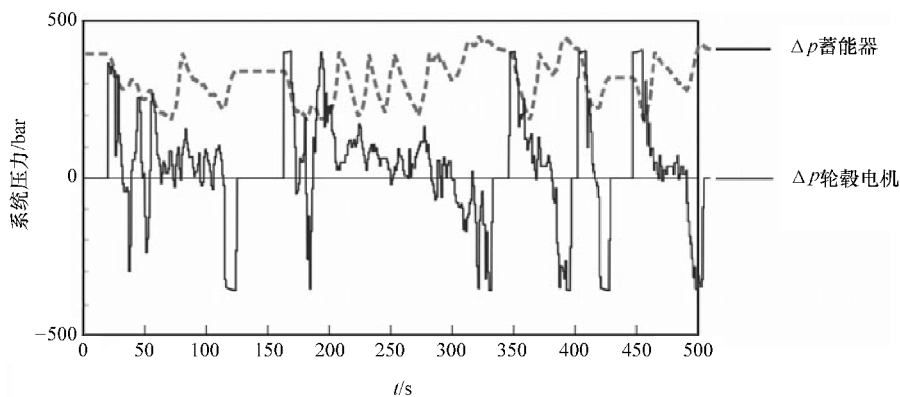


图 4.83 在美国 FTP 循环测试中，车辆最初的 500s 内，高低压蓄能器之间的压差和轮毂电机之间压差

在混合动力技术中，图 4.83 所示的正负压力差之间的间隙由液压变压器调节。该功能使蓄能器压力符合驱动系统的要求，且其工作原理也是“浮杯”原理。忽略损耗得出以下关系

$$(\Delta Q)_{\text{ein}} = (\Delta p Q)_{\text{aus}} \quad (4-30)$$

式中 Δp ——压差 (bar)；

Q ——体积流量 (L/min)。

表 4.8 为液力混合动力车辆在模拟计算中得出的各项参数。

表 4.8 模拟中的液力混合动力汽车的数据

空重	1450kg
最大牵引力	5700N（全轮）
最高车速	190km/h
迎风面积	2.26m ²
风阻系数	0.26
车轮直径	0.63m
滚动阻力系数	0.008
柴油机	100kW
存储空间	20L
存储压力	200~420bar
泵的吸入容积	56mL/r（恒定）
变压容积	56mL/r
轮毂电机吸入容积	56mL/r（恒定）
轮毂电机之间最大压力差	500bar

借助液力变压器可以实现四象限工作（向前和向后的驱动及制动）。液力变压器本质特性在于其扩压能力，其作用在于满足爬坡能力、加速性能以及弹性方面的要求。通过液力变压器，强大和高效的定量液力变压器可应用于车轮驱动机构。定量液力变压器体积小，因为即使蓄能器压力只有 200bar，液力变压器也可以将压力扩大到 500bar。

静力液压变速器的平均效率不及机械变速器。图 4.84 为测得的液压泵、轮毂电机和液力变压器的效率特性曲线。但是，通过自由选择发动机的工况点及制动能回收，上述不足之处不仅完全被弥补，甚至成为其优势。

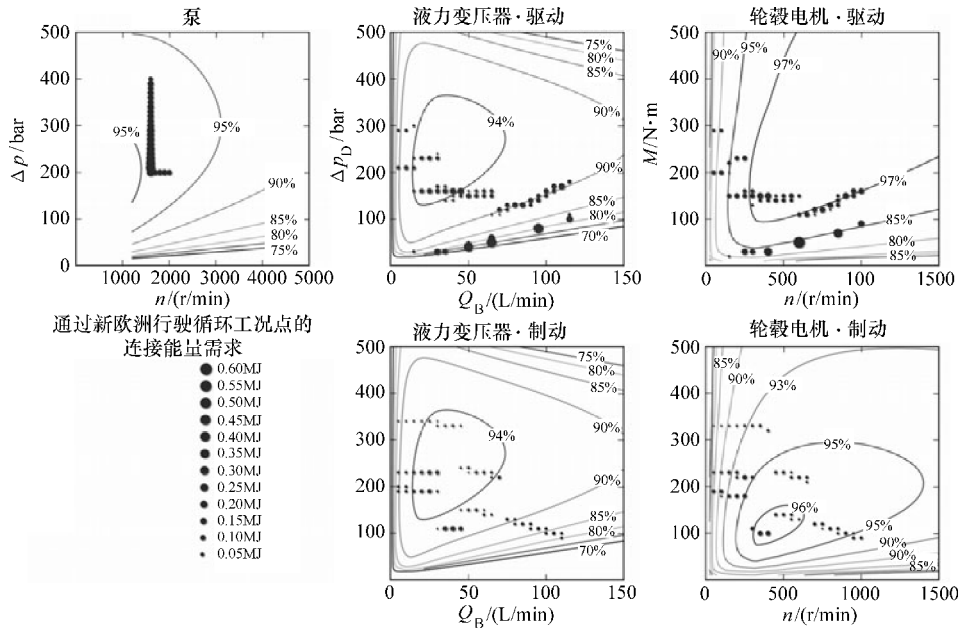


图 4.84 液压系统中各液压元件的效率特性曲线以及新欧洲行驶循环工况点

4.4.12 各种蓄能系统的比较

电池技术

由于电存储系统应用范围广，所以在此单独列出来进行比较，再与机械蓄能系统进行比较。本章进行了大致的介绍，比能量（ $W \cdot h/kg$ ）和比功率（ W/kg ）是选择蓄能器的重要参数。图 4.85 所示为 10 种适用于混合动力汽车的各种电池系统的能量密度和功率密度的 Ragone 曲线。

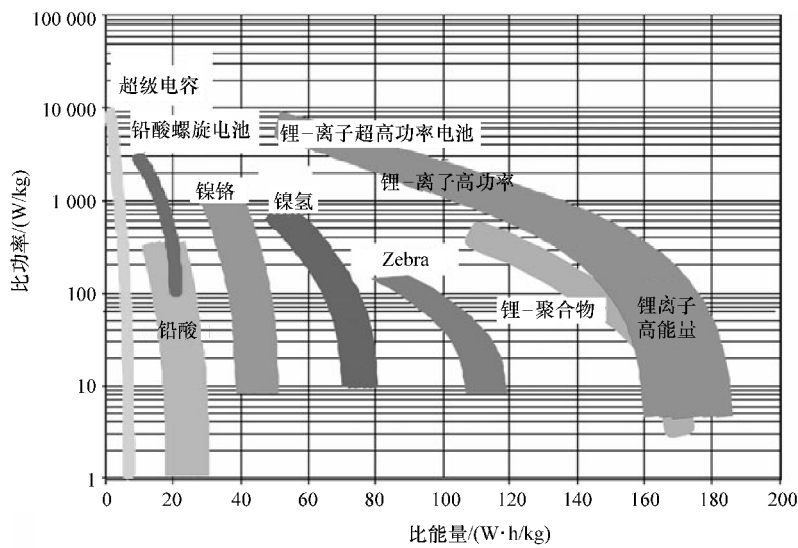


图 4.85 电池存储的 Ragone 曲线对比示意图

如图 4.85 所示，锂离子电池和镍氢电池的能量密度最大。双层电容器（超级电容）的功率密度最大。简而言之，超级电容作为首选可满足短时间内大功率的要求，而其他电池提供更大的能量密度，尽管电池的特点是负荷越大能量密度越低。表 4.9 列出各电池存储系统的技术参数。所列参数中有些值为范围值，其原因是参数与车型、混合动力类型、操作方式等边界条件相关。例如，混合动力汽车应用中，由于寿命的原因，电池只允许在一定的充电状态范围不间断充放电（如奔驰 S400 混合动力版的充电状态差额通常低于 10%），但对于纯电动汽车而言，电池容量在某些情况下利用率可高达 80%。

表 4.9 电池的技术参数

电池特性	铅酸	镍铬	镍氢	锂离子	钠硫电池	Zebra 电池	超级电容
理论能量特性							
比能量/($W \cdot h/kg$)	170	210	220 ~ 380	500	760 ~ 790	790	
能量密度/($W \cdot h/L$)	690	700	990 ~ 1134	300 ~ 400	1200		
实际能量特性							
比能量/($W \cdot h/kg$)	20 ~ 50	40 ~ 55	40 ~ 80	110	90 ~ 120	100 ~ 120	2 ~ 4
能量密度/($W \cdot h/L$)	70 ~ 100	80 ~ 110	100 ~ 270	270	100 ~ 120	160	2.5 ~ 4.5

(续)

电池特性	铅酸	镍铬	镍氢	锂离子	钠硫电池	Zebra 电池	超级电容
实际功率特性							
比功率/(W/kg)	80 ~ 100	<200	<200 ~ 1300	500	125 ~ 130	110 ~ 150	2000 ~ 4000
功率密度/(W/L)	160 ~ 200	<360	200 ~ 700	1250	110 ~ 140	130 ~ 265	3000 ~ 5000
电压							
空载/V	2. 1 ~ 2. 5	1. 3	1. 3	至 4. 2	2. 1	2. 59	
额定/V	2	1. 2	1. 2	3. 8			2. 7 ~ 3. 0
充电结束/V	2. 7	1. 55	1. 45	4. 2			
放电结束/V	1. 6	0. 8	0. 9 ~ 1. 1	2. 5			
能量效率(%)	>90	78	70	93	83 ~ 85	91	90 ~ 95
自放电							
电子的/天/(%/天)	0. 1 ~ 0. 4	0. 6 ~ 1	1. 5 ~ 20	0. 15	0	0	3 ~ 20
热学的/天/(%/天)					15 ~ 17	15 ~ 17	
运行温度/℃	- 10 ~ 40	- 40 ~ 60	- 20 ~ 60	- 20 ~ 60	> 300	> 300	- 40 ~ 70
充电速度(%)	50 充电 2h	97 充电 0. 5h	97 充电 0. 5h	95 充电 1h	100 充电 3h	90 充电 3. 5h	50 充电 0. 5 ~ 5s
	100 充电 5h	100 充电 1h	100 充电 1h	100 充电 4h		100 充电 5h	100 充电 1 ~ 10s
免维护	是	否/是	是	是	是	是	是
寿命							
年	3 ~ 5	>4			1 ~ 2	5	> 10
循环次数	700 ~ 800	2000	2000	> 2000	> 1000	> 600	> 1 000 000
深度放电	有限可能	可以		可以	问题	可以	可以
过度充电	可以	必须		问题	问题	可以	可以
循环利用能力(%)	98	100			97		研发中
成熟度	大量生产	大量生产	量产	首产	量产前	量产前	量产
批量成本/(\$ /kW · h)	50 ~ 150	500	200	300 ~ 1000	100	200	
特性	成熟	充 电 快, 高温下充电 慢、具毒性	充电快	潜 力 大、 需要电池管 理系统、事 故中有安全 隐患	需要加热/ 冷却系统	需要加热/ 冷却系统自 动跳过故障 电极板	无需冷却、 充电很快、循 环稳定性极 佳、- 40℃ 仍 可工作

与应用在电动汽车上的电池相比，应用在混合动力汽车上的电池容量相对较小而功率较大，所以功率密度通常是选择适用于混合动力汽车的电池的首要标准。因此，目前镍氢电池是最适合混合动力技术的电池，尽管现阶段锂离子电池成本过高，但今后必将成为主流。锂离子电池和超级电容的新兴组合也可能有不错的发展前途，因为这一组合在允许范围内使容量和性能得到平衡。

除了安全因素以外，提高比能量和比功率以及降低成本是未来电池研发的重点。比能量取决于理论比电容和电极材料的电势差。图 4.86 中显而易见，锂具有非常良好的特性，适合作为电极材料。大众公司在研发合成材料方面取得的进展是：锂离子电池技术使电池比能量增加至 $200\text{W} \cdot \text{h/kg}$ ，如图 4.87 所示。任何性能提升都只能通过技术革新实现。新兴组合以及锂离子技术比较，如图 4.88 所示。

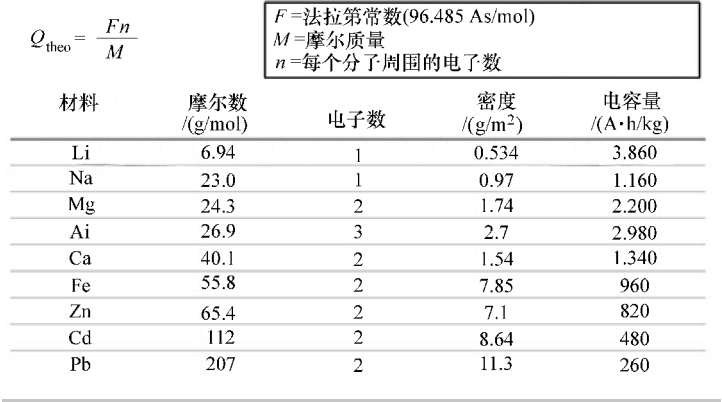


图 4.86 不同电极材料的理论比电容

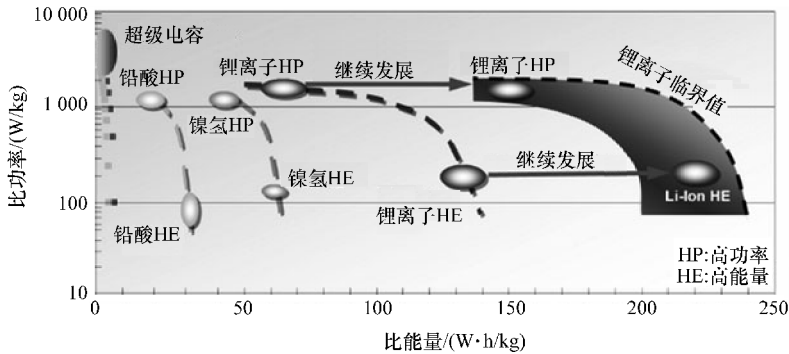


图 4.87 相关锂离子电池的 Ragone 曲线

理论能量密度

有潜力的新技术:

- 含氟的化合物作为阴极材料
- 金属-空气电池
- 高温电池
- 锂离子电池

系统	理论能量值/(A·h/kg)	(V)	理论比功率/(W·h/kg)
Li/F ₂	1.035	5.91	6.115
Li/O ₂	1.787	4.27	7.629
Mg/O ₂	1.330	3.61	4.801
Zn/O ₂	659	2.00	1.317
Na/NiCl ₂	304	2.58	783
C ₆ /LiCoO ₂	170	4.20	420

图 4.88 二次电池新技术的理论能量密度新技术

比较所有可行的蓄能形式

目前，电储能系统是混合动力汽车应用的主流储能系统，其原因是电池系统具有绝对高的比能量，其次是电能转换成电功非常简单。典型的混合动力电池的比能量为 $10 \sim 200\text{W} \cdot \text{h/kg}$ ，

如图 4.89 所示。因此,考虑到其体积,电池的蓄电能力可以很强。介于其比功率在 $10 \sim 2000 \text{ W/kg}$, 且电池有一定内阻,只要电池的结构尺寸保持在合适的范围内,放电过程就缓慢持续存在。放电通过放电时间表示,而放电时间取决于比能量 $E_{\text{spez.}}$ 和比功率 $P_{\text{spez.}}$

$$T = \frac{E_{\text{spez.}}}{P_{\text{spez.}}} \quad (4-31)$$

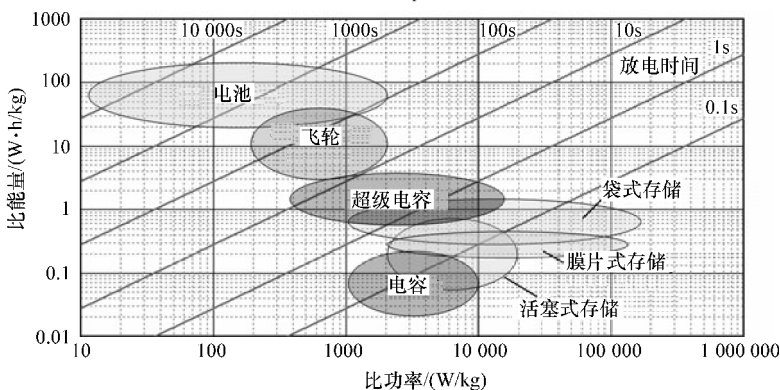


图 4.89 不同蓄能技术的 Ragone 曲线

自重较大的车辆,比如货车,回收的制动能用于支持车辆起动(加速),因此在电池的选择上只能采用成本相当高的电池,这类车辆的蓄能系统需具有非常高的比功率。对于城市公交车,由于其自重大且起步停车频繁,非常适合采用超级电容作为蓄能器,参见章节 7.1 “混合动力公交车”。此外液压气动蓄能器主要应用于混合动力垃圾回收车,因为该蓄能系统的功率密度为 $4000 \sim 200\,000 \text{ W/kg}$ 。其制动产生的功率将全部存储于蓄能器中,即使是在大型车辆突然减速的情况下。其不足之处在于,在某些应用中,如液压油流速快时,会产生较大的噪声和出现液压泄漏。

飞轮蓄能器同样具有相对较高的比功率和比能量,其性能在电池和超级电容之间,如图 4.89 所示。其最大优势在于高循环稳定性强和允许的工作温度高,因此其用于冷却设备的成本低于电池系统。

除了在比能量和比功率方面的要求以外,蓄能器的选择还取决于其成本、安全性、集成可能性等。今后,根据不同的要求和边界条件将采用不同的蓄能系统。对蓄能系统的普及产生重大影响的仍是在研发过程中不断提高电池系统的比能量、比功率和降低成本,而锂离子电池技术首当其冲。

4.5 辅助装置

混合动力汽车和纯电动汽车需要依靠辅助装置来对动力总成进行额外的改进。其改进,首先是升级到电力驱动的转向助力泵、制动助力器、空调、冷却液泵、传动装置润滑油泵等,其目的是使发动机在不工作时车辆的全部功能保持正常运行。这些装置的电气化带来的优点在于通过辅助装置的随意组合以及根据驾驶人需要进行操作,但是通常造成复杂性和成本的升高。图 4.90 为戴姆勒插电式 Sprinter 车型的动力总成与辅助装置。

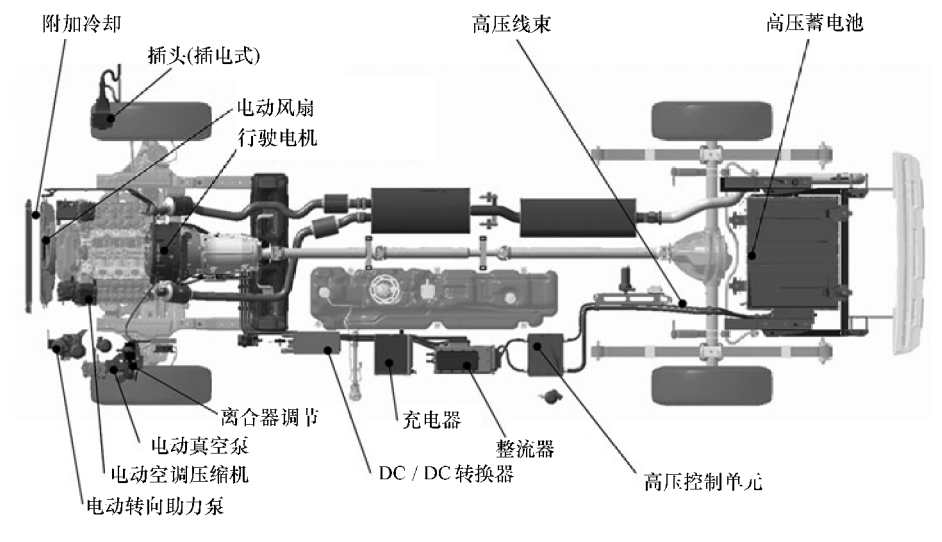


图 4.90 戴姆勒插电式 Sprinter 车型的动力总成与辅助装置

重要的是需要考虑到辅助装置的能量需求，在某些系统中需要持续供能，比如车内冷暖空调或电机 - 整流器单元。由于额外的能量需求，混合动力技术的节能潜力有时候明显降低。

接下来详细介绍 3 种专门为混合动力汽车和电动车开发的辅助装置。

4.5.1 液压脉冲储存器 (HIS)

控制和激活自动变速器内的各种电路元件离不开液压技术。常规自动变速器通过一个内部油泵对油压进行供应，该油泵通过变矩器的泵侧直接与发动机转速结合。混合动力汽车中，油压供应是通过发动机起/停系统功能实现的，当车辆静止时，自动变速器的油泵也停止工作，因此无需油压支持功能，电子元件断开，变速器回置为空档。为了满足驾驶人在发动机停止期间突然快速起动的要求，除了发动机以外自动变速器也需要快速起动，其电子元件在发动机起动时快速闭合，使发动机驱动静止的车辆。这意味着自动变速器必须在 350ms 内做好车辆起动准备。所需的电子元件必须在这一时间填充油泵，并施加传递转矩所需的油压。该功能可以由电动油泵实现，因此需要额外的电能支持，并且造成系统成本增加。采埃孚公司开发出液压脉冲储油器作为另一种选择，电子元件在发动机起动时按照所储存油量极快填充油泵，以避免起动延迟。上述功能可以通过一个活塞弹簧蓄能器实现。活塞弹簧蓄能器的活塞通过弹簧形变最终状态在机电控制下保持一定位置。发动机停止运转时，该蓄能器中的油量没有油压，所以在这一过程中不存在压力状态下漏油的情况。机电锁定所需的电功率远小于电动辅助油泵系统。该系统成本也相对较低。

HIS 装置由一个活塞弹簧蓄能器、一个根据弹簧形变锁定活塞位置的机电锁定单元以及一个单向阀构成。HIS 装置加载时，集成在液压结合处的单向阀处于节流位置，如图 4.91 所示。由此确保为变速器供油时只提供有限的体积流量，以及 HIS 装置加载过程中为变速器和控制单元供油不受影响，因此不会出现可能对换档质量产生不良影响导致系统压力中断。通过调节节流阀的位置可以控制体积流量，从而轻松调节 HIS 装置的加载时间，进而使 HIS

装置适应不同条件。加载时,受弹簧控制的活塞向卡槽方向运动,并在完全加载时超过滚珠卡槽位置。在到达末端挡块位置时,闭锁机制到达锁定位置。机电锁定状态下,吸持磁铁需要极小的电流来维持其吸力。

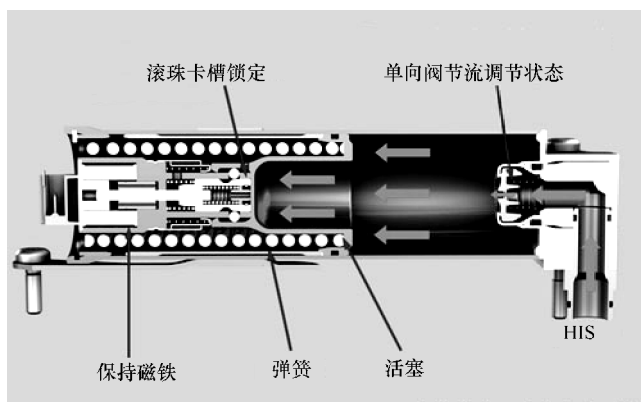


图 4.91 HIS 加载过程单向阀到达节流位置—在末端挡块位置击发卡槽机制,形成锁闭状态

如果发动机在 HIS 装置锁定状态时停止工作,系统压力下降,因此 HIS 装置内压力也将消失。在弹簧力作用下,活塞到达滚珠卡槽位置,并保持在这一位置。在发动机启动时所需的用于液压填充脉冲的能量将被储存于压缩的弹簧中。由于 HIS 装置在发动机停止工作阶段没有油压,因此也无漏损。

发动机重新启动时,通过切断吸持电流使 HIS 装置解锁。电枢通过分离弹簧向活塞方向施压,滚珠卡槽松开。活塞通过弹簧力将储存在活塞筒里的油推出,单向阀回到开启位置,由此保证排油面积体积足够大,从而使排出过程中压力损失最小,如图 4.92 所示。

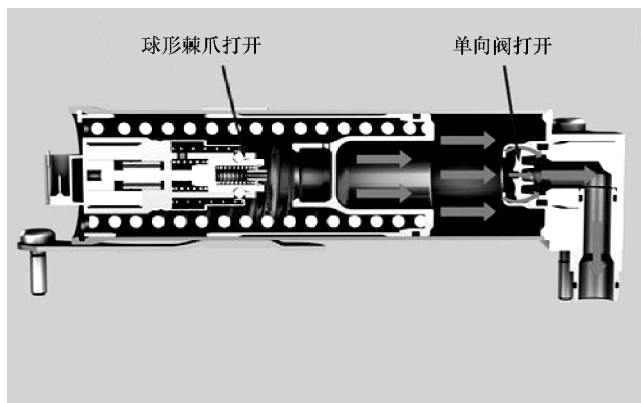


图 4.92 HIS 加载结束—单向阀打开—卡槽机制同时被击发

根据发动机转速变化,所选择的驱动系统需要 300 ~ 350ms 做好车辆起步准备。图 4.93 所示为带 HIS 装置的车辆从发动机完全静止到车辆起步的系统压力建立。为了方便比较,也画出了无 HIS 装置的系统压力建立曲线,结果表明无 HIS 的车辆起步延迟约 800ms,是不能接受的。实践表明, HIS 装置理想的安装空间位于液压控制装置之后。与液压控制装置的液压连接是通过浇铸在变速器壳体上的管道与控制系统连接实现的。图 4.94 所示为带 HIS 装

置的 8HP70 自动变速器的截面图。

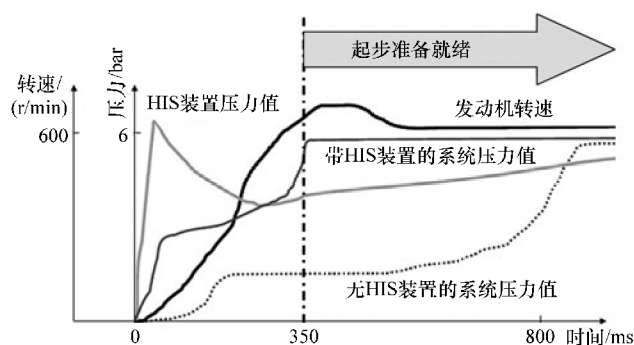


图 4.93 带有 HIS 的驱动系统在自动起动发动机时压力建立过程

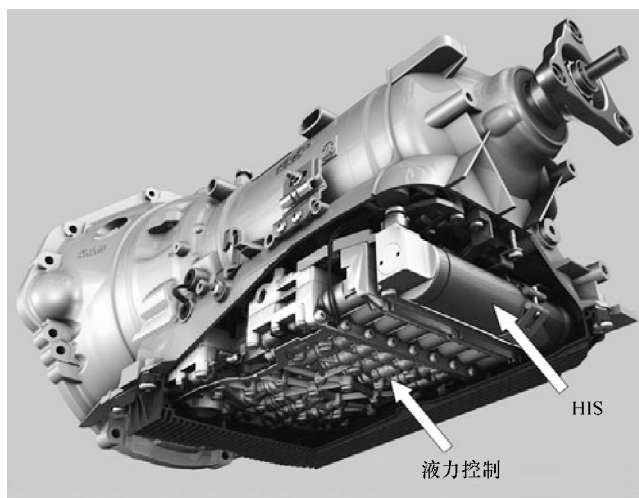


图 4.94 8HP70 自动变速器（带有 HIS）剖面图

4.5.2 电动助力转向器

全混合动力汽车和部分中度混合动力汽车在一定的速度范围内都实现了电力驱动。出于安全性和舒适性要求，在发动机停转的状态下必须保证转向时得到伺服支持，因此，在混合动力汽车上，直接由发动机传动带驱动的液压助力转向装置（HPS – Hydraulic Power Steering）不适用。

在车辆静止的情况下，搭载起/停系统的车辆只能在发动机起动后，纯液压助力转向才能对转向进行支持，然而因此在一定程度上影响了节能。

一种可实现的补救措施是电力驱动泵组：电动液压助力转向系统（EPHS – Electrically Powered Hydraulic Steering）。因此，转向辅助可以根据需求进行控制，液压供给不依赖于发动机转速。与常规液压转向系统相比，该技术可节省达 80% 的驱动电力。助力需求取决于车辆速度和转向角信号确定。根据这两个值计算出发动机—液压泵—辅助装置的额定转速，从而确定液压流量。美国 TRW（天合）汽车集团开发的电动液压助力转向装置 EPHS 使用

(外啮合齿轮泵) 正弦波无刷电动机作为液压泵驱动器。液压最大流量为 $7.8 \sim 12.0 \text{ L/min}$, 压力为 $99 \sim 120 \text{ bar}$ 。最大电流消耗为 13.5 V 电压下 $85 \sim 115 \text{ A}$, 待机状态下电流消耗低于 2.5 A 。

另一个方案是机电转向系统, 即电动助力转向 (EPS, Electric Power Steering), 仍然由车载电路供电。电动助力转向装置凭借其强大的扩展功能, 与常规液压助力转向装置相比优势明显。这里需特别提到的是, 对速度敏感的转向转矩辅助, 主动转向回位以及速度感应转向缓冲器, 其作用是减轻车身左右晃动。通过如车速、转向角等传感器信号也能够在行驶速度提升时使转向轮阻力矩与增加的速度相互协调, 增加转向力。当车辆处于静止或低速行驶状态时, 对速度敏感的助力装置通过较小的转向力提高了车辆的驾驶舒适性。

通过修改功能软件的参数可实现电动助力转向装置的调节或应用。也就是说, 在硬件相同的情况下可以根据驾驶人的要求, 通过修改软件的选择使车辆操控趋向于运动型或舒适型。另一个优势在于降低能耗。当驾驶人进行转向操作时, 伺服电动机对转向进行控制。与常规液压转向系统相比, 该电动助力转向装置的功耗使燃油消耗降低了约 0.2 L/100 km 。

此处以采埃孚 Servotronic 电动助力转向系统为例。其工作原理是电控电动机驱动, 并考虑到在助力转向系统所涉及各种参数, 例如行驶速度、转向角度、转向转矩和转向速度。根据车辆大小可采用不同的助力转向系统。在小型车辆上, 助力单元与电子元件都集成在转向轴内, 如图 4.95 所示。

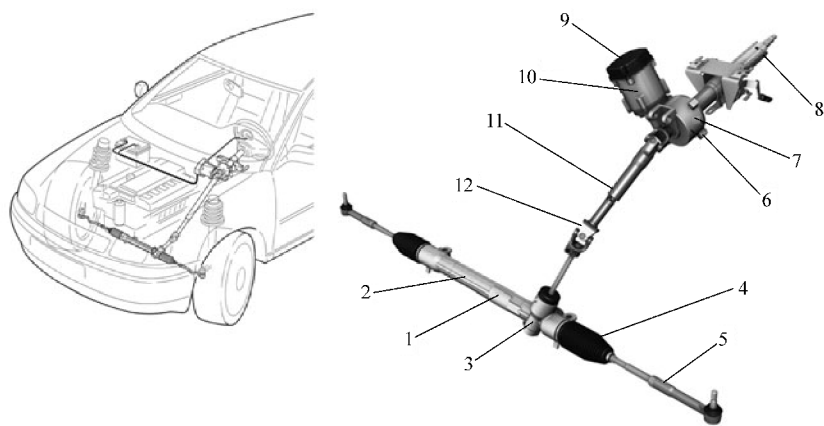


图 4.95 机械齿条转向的结构图 (采埃孚电动助力转向 EPSC)

- 1—壳体 2—齿条 3—小齿轮 4—折叠套 5—横拉杆 6—螺旋齿轮传动装置 7—转矩传感器
8—上转向柱 9—电子控制器 10—电动机 11—转向中间轴 12—轮向轴连接器

通过中间轴、万向节轴与机械齿条转向机构相连接。传感器和扭杆位于螺旋齿轮传动装置一侧, 如图 4.95 所示。由电动机产生的转矩经由螺旋齿轮传动装置转换为助力转矩并传至转向轴。

大型车辆的助力单元连接在传动小齿轮上, 其原因在于可以传递较大的力矩, 如图 4.96 所示。

助力单元与双传动小齿轮相连的结构实现了传感器单元与传动单元空间上相互独立, 使

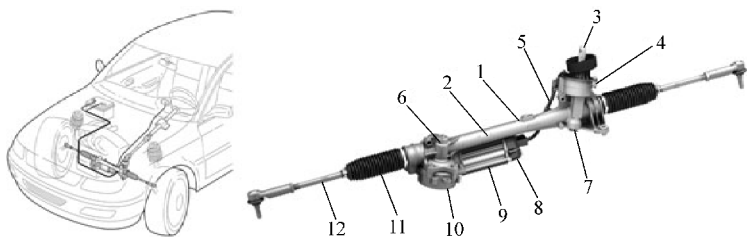


图 4.96 双小齿轮带助力单元的采埃孚 Servolectric 电动助力转向 (EPSdp)

1—壳体 2—齿条 3—转向轴连接器 4—力矩传感器 5—传感器线缆 6—主动小齿轮 (双小齿) 7—转向小齿轮
8—电子控制器 9—电动机 10—螺旋齿轮传动装置 11—折叠套 12—横拉杆

转向输出比与传动小齿轮输出比相互独立,使设计上的性能优化成为可能。根据车辆大小不同,系统性能提升范围在 10% ~ 15%,通过优化安装空间保证优良的碰撞安全性。

根据所需的最大齿条转向力和调节强度选择和采用不同的电动助力转向技术。中型车辆需要约 10kN 的齿条转向力,有效调节强度所需功率约为 1kW。常规车载电网系统 (12V) 勉强可以满足这一需求。混合动力汽车凭借其车载电压高的优势具有更多潜力,同时也适用于大型车辆。

4.5.3 车载暖风和空调

搭载混合动力系统的车辆还需要改进车内暖风和空调系统的解决方案。整体效率高必然导致热损失低,其散发的热可以用于车内供暖。当车辆处于静止状态发动机停机或纯电力驱动时,散热少这点更明显。而暖风和空调的正常运行不仅与舒适性有关,而且对安全性而言也非常重要。例如,必须保证风窗玻璃快速除冰或保持镀层清洁。常规车辆是利用发动机的可用余热进行供暖,或在需要时通过传动带驱动空调装置的压缩机。混合动力汽车具备起/停系统功能或在纯电力驱动时使发动机停止工作,因此在供暖以及空调系统上更有新的要求:

- 1) 使用额外的热源进行供暖;
- 2) 独立驱动的空调或蓄能器制冷。

供暖系统

混合动力汽车由于车载电网有所增强,可以根据 PTC (Positive Temperature Coefficient, 正温度系数) 原理提供电动暖风。

另一种可能性是使用一个冷却剂回收器/废气热交换器,在冷启动后充分利用废气中的热能迅速加热冷却液。例如,雷克萨斯 RX 450h 采用了该技术,请参阅章节 6.2。

对具备起/停系统功能或短距离纯电力驱动的车辆而言,利用发动机储存的余热也可以作为一种选择,由此需要增加一个独立于发动机之外运行的冷却液泵。剩余的热量可以通过特性曲线恒温器扩大,从而在部分负荷时使冷却液温度升高。

空调系统

非纯发动机驱动的方案需要独立的空调系统,不依靠发动机独立供暖和制冷。该系统特

别适用于极端的环境条件下,而常规空调在发动机停止运转后出风温度将快速上升,使车内空气湿度增大,会让乘客感觉不适。

采用电驱动空调压缩机作为标准空调补充装置,该压缩机的作用在于当发动机停止运转后也可以使出风温度保持不变,如图 4.97 所示。电动空调压缩机的驱动功率高达 3kW,因此需要一个相应的功能强大的车载电网进行支持,部分中度混合动力汽车和所有全混合动力汽车配有该系统。所谓的混合动力空调压缩机既可以通过传动带式机械传动,也可以通过车载电网进行驱动。

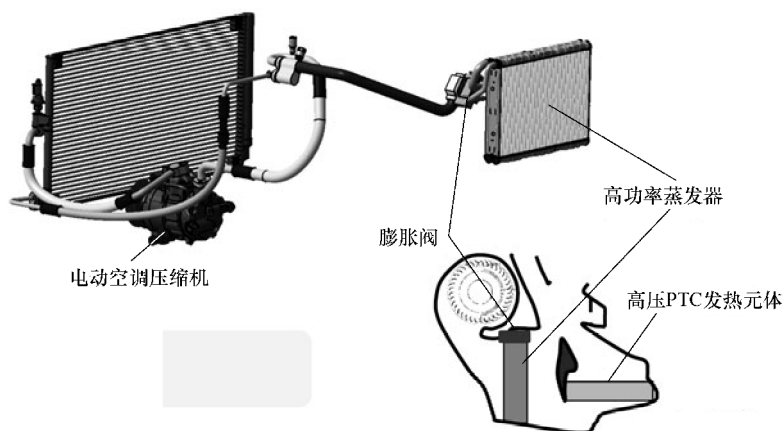


图 4.97 电动汽车和混合动力汽车的空调系统

蓄冷器

微混合和部分中度混合动力汽车未配备大功率车载电网,因此车辆静止时需要一个装置代替电动空调压缩机,这种概念即通过蓄冷器制冷。蓄冷器的工作原理是可以抽走热量和延迟出风温度上升。蓄冷介质非常有效,蓄冷器中该介质的固液相变温度为 5℃。

蓄能式空调系统在短时间停车时最重要的两点是工作频率和城市交通中停车时间的长短。因此对该蓄冷器的一个重要的要求是:必须在短时间内完成充放电。小型车辆在城市交通中合适的充电时间应在 1min 内。为了满足这一要求,该蓄冷器集成在车载蒸发器中,并设计成一个管中管系统。此外,内外两管之间的空间填充有液态的蓄冷介质。在车辆行驶过程中,内管中流过冷却剂,外管中的介质在蒸发过程中被抽走足够的热量,直至内外管之间的蓄冷介质冻结。由于蓄冷介质的热导率不是非常高,内管壁不能太厚。当压缩机停止工作时,蓄冷介质不再被冷却而是开始融化。所需的融化过程中的能量来源于车内的空气。在换气过程中,车内空气流经蓄冷式蒸发器从而进行制冷。图 4.98 所示 Behr 公司第二代蓄冷式蒸发器机构(较薄型)。

它由两个部分组成:一个主蒸发器和蒸发器的蓄冷部分。在工作过程中,制冷剂同时通过这两个部分。该蓄冷式蒸发器需要的空间稍大于标准蒸发器。因此,在大多数情况下,该蓄冷器可以集成在现有车载空调内。蓄冷式蒸发器可以很容易地取代标准蒸发器,而制冷剂回路本身无需改变。下一步需要适配调控,例如,空气循环线路、空气流量和蒸发器的出风温度。设定这些控制变量的目的是:使蓄冷式蒸发器在尽可能长的停车时间内,将车内舒适



图 4.98 第二代蓄冷式蒸发器构造

度保持在可以让人接受的范围。图 4.99 对蓄冷式蒸发器和一个标准蒸发器出风温度进行了最基本的比较。蓄冷式蒸发器出风口温度上升显著延迟，舒适度保持时间较长。

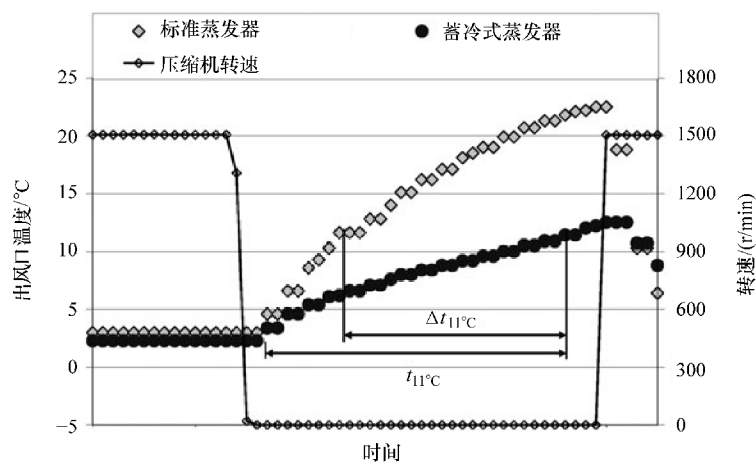


图 4.99 压缩机停止后蒸发器出风口温度上升过程示意图

动力管理系统根据驾驶人的意愿和操作条件，协调传动系统各部件的整体功能。其运行策略在于，除了首先满足驾驶人的行驶愿望，还必须考虑到在不同条件下，如在维持电池寿命的前提下，同时追求节能、减排和舒适性。因此，这一运行策略本质上就是协调电能的产生和消耗，在这一点上，首先是实现对电机和发动机的相互协调。如前所述，两个能量存储装置和能量转换器的存在，使发动机的运转在一定范围内不受驾驶人操作的左右。混合动力汽车的控制策略正好利用了这一特性，在考虑到不同边界条件的前提下使车辆保持在尽可能省油的工况，通过调节传动链上的各个功率电子元件，实现驾驶人的愿望。

此外，边界条件包括保持电池的充电状态范围（SOC = State of Charge），保持通过电池或通过电动机和电池的允许温度范围内的能量流。传动链管理系统的运行策略也包括满足舒适性的要求，例如尽可能保证车内供暖和制冷的最佳状况。图 5.1 为传动链管理系统总览示意图。该系统除了调节机械动力驱动车轮外，还包括调节热量和电能的分配。其调节包括高压和低压车载供电、电动装置，如空调压缩机、转向助力泵及各种增压器和液压泵。传动链管理系统的其他任务包括各个系统或控制装置与驾驶人之间的数据和信息交换（通信），以

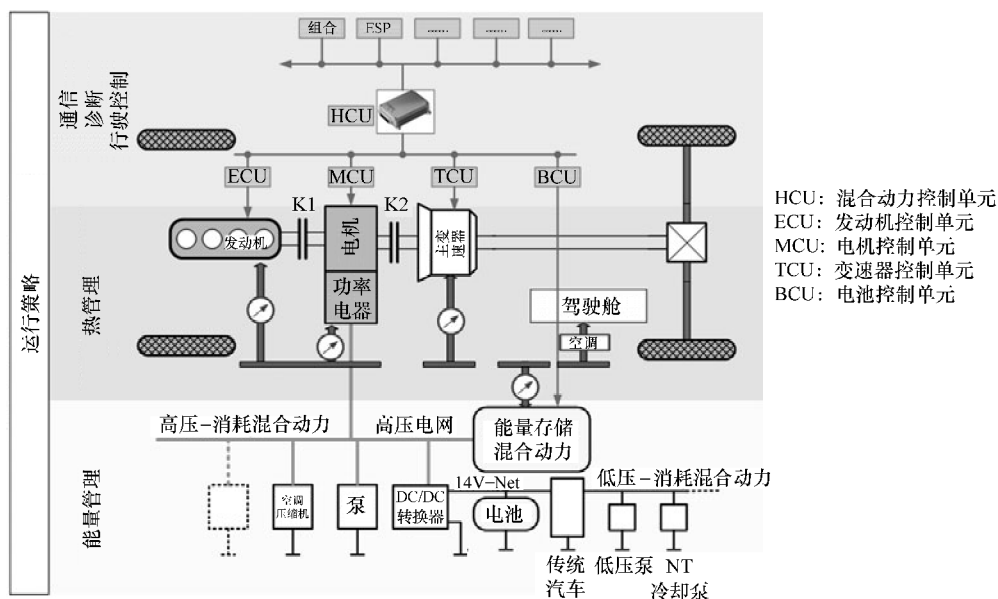


图 5.1 动力管理系统总览示意图

及各种诊断功能的执行。数据交换通常是通过多个总线系统进行。图 5.1 所示为通信范围内的上级混合动力控制单元 (HCU——Hybrid Control Unit)，通过该控制单元实现了运行策略。其运行策略是一方面动力总成通过控制单元与发动机、电动机、变速器、电池等相连接，另一方面驾驶人侧可以对各种输出和输入系统进行操作。

5.1 混合动力汽车的工况

如前所述，混合动力汽车可具备两个蓄能器和两个能量转换器，使传动系统的任何一部分在运行中有更多自由度，以满足驾驶人的要求。此外，相对于常规车辆，混合动力汽车除了发动机驱动模式以外，还具有起/停模式以及其他行驶模式。采用哪种行驶模式，不仅在于选择哪种能源载体（电驱动、发动机驱动或两者联合驱动），还在于如何将机械能转换成电能和电能如何存储。

以下工况基本上可以出现在并联式和功率分配式混合动力技术中实现：

(1) 车辆静止时

- 1) 发动机不工作—起/停：车辆处于静止状态，所有驱动装置关闭；
- 2) 静止状态下的负荷点提升：车辆处于静止状态，发动机驱动发电机发电。

(2) 车辆行驶中

- 1) 制动能回收（再生制动）：该工况下采用发电机对车辆进行制动，同时发电；
- 2) 行驶中负荷点提升：发动机产生的机械能部分用于车辆驱动，部分用于发电；
- 3) 特殊情况（滑行）时电力驱动：车辆在发动机不工作时只通过电机进行驱动。滑行时电机不提供转矩，即车轮在无驱动力的情况下滚动；
- 4) 提速：电机为发动机提供动力支持；
- 5) 纯发动机驱动：车辆仅由发动机驱动。

串联式混合动力技术一贯采用电力驱动，因此跟上述驱动方式相比有一定区别。原则上串联式混合动力汽车的发动机可以在一个或多个次级工作点上间歇性高效率地工作，因此要求大量暂时储存的电能，或者连续工作的电机适应当前能量需求。车辆各种工况都受到一定条件的限制。这些限制条件根据与输入值相关的运行策略确定。

因此尤其需要注意下列变量：

- 1) 驾驶人意愿：加速踏板位置、制动踏板位置、转向意愿、工况模式（手动变速器档位）、供暖或制冷的要求，还可能包括导航系统中的目的地数据；
- 2) 系统内部数据：当前联动装置的转速和转矩、车速、电池充电状态、车内外温度，与车内模拟模型协调一致；
- 3) 记忆数据：行驶历史、路线（经常往返路线等节能性能）、从交通信息系统获得的数据和 Car2x 车辆通信技术。

输出变量：向各种组件发出的命令。

- 1) 发动机：开/关、额定工作点（预设转矩）；
- 2) 电动机：开/关、转向、转速和转矩调节（根据不同混合动力系统）、额定转矩或额定转速；
- 3) 所有的离合位置和操作；

- 4) 变速器: (自动变速器) 档位选择;
- 5) 制动: 制动力取决于所回收的制动力;

.....

根据输入变量通过运行策略确定操作模式,并将相应的输出变量传送到相应的控制设备。因此,运行策略对能量消耗和混合动力汽车的排量有显著影响。

5.2 运行策略

对不同运行策略的重视程度应该根据车辆行驶的路段,甚至是行驶前是否通过循环测试而有所不同。已知循环测试包括如在导航系统中输入目的地坐标,储存相应的海拔地形数据,或者通过有效路段识别,即在路段的开始就进行识别性绘图,参见章节 5.4。然而,必须指出的是,在上述情况中交通状况影响无法预测,因此不包括在内。基本上,只有在已知的循环测试中和一定要求的限定下,才能找到行驶路段最佳的行驶方案,如最低油耗。在实际操作中及大多数情况下,只有在线提供的操作参数以及可能找到的统计数据作为输入变量的操作策略,而不是在时间上或地点上的制动和减速操作。因此,通常不可能对最佳操作模式进行预测。

另一方面,有必要在混合动力汽车的研发中,开发不同部件及不同尺寸等方面的潜能以满足目标设置的需要,由此在给定的循环中得出最佳运行策略。通常情况下,此处所涉及的循环行驶为根据政府规定的排放及能耗所采用的循环测试,以及所谓的真实生命周期实际循环测试,则代表了消费者要求。

除了对不同的硬件进行对比以外,还可以从已知的最优运行策略中推导出普遍策略(次优的运行策略),从而作为实践中一个良好的出发点。此外,用在实践中得出的运行策略与最佳策略进行比较,从而判断其结果是否达到良好的等级。

接下来的章节里列举了若干调节和优化运行策略的方法。在车辆模拟和循环测试过程中确立运行策略,参见章节 5.3。

5.2.1 运行策略分类

该控制策略可分为“非因果式”策略和“因果式”策略两类。根据最优和次优的运行策略进行测试后得出的结果可以进行再分类。在实践中,通常采用启发式策略,再根据该策略确立过程中所实施规律的类型命名。

非因果式运行策略

采用“非因果”策略进行测试时驾驶模式必须是已知的。在此基础上可以使用各种优化方法得出最佳方案。该方案本身和每个时间点输出值在不某些特定情况下或规律面前并不特别合理。

因果式运行策略

根据该原则进行的控制完全以即时车辆数据和统计数据为基础输入变量为依据。在实践

中，只有该类控制方案或运行策略可以进行操作，因为受到驾驶人本身以及路况影响，完全精确的驾驶模式无法进行预设。

最佳运行策略

最佳运行策略的目的在于从已知循环测试中根据现有的边界条件找到一个最佳方案，如省油。操作的最有效的方式不是在每个时间点得出效率最高的工作点，而是最大限度地减少整个循环测试的燃料消耗。其他类型的策略必须遵循不同的电池充电状态极限值，如通过电池的能量流、电器元件的最大功率、不同的温度范围等。此外，关于其他目标变量的情况可以通过索引值进行评估。这样一来，就有可能借助附加标准通过相应的加权进行评估，如最小排放或最快供暖。在该测试开始和结束时，必须首先考虑到能量存储系统的能量含量。能量含量既可以通过设定值进行检测，即在该测试开始和结束时的能量含量相同（电池充电状态稳定），也可使用加权函数对其差异进行评估。

为了找到最佳的解决方案可采取不同的方法：静态优化法、数值优化法、分析优化法。

静态优化法

根据预定的速度和高度分布以及车辆数据可以计算出所需的驱动力大小，同时考虑到效率及损失。通过计算出的驱动力可按照时间顺序计算出所有可能的变量（该变量与混合动力系统中能量流动相关），从而得出最佳方案。特别是其中很多变量所需的计算和存储空间开销庞大，因此该方法仅适合于简单系统。

数值优化法

通过用数值优化法得出非线性目标函数的最小值（例如燃料消耗与所有的输入变量相关）。实例包括梯度下降法、莱文贝格-马夸特方法、遗传算法、动态编程等。

分析优化法

该方法的目的在于减少直接数值优化法的巨大计算工作量，通过简化（如线性化等）减少变量数。

次优运行策略

车辆行驶实践中的“非因果”运行策略必须转化为在“因果式”运行策略下进行，即以规律和函数为基础。该策略的普遍适用性使其不可能成为各类循环测试的最佳方案。其目的在于使这些次优控制在车辆的各种工况和不同要求下接近最优方案。

启发式控制策略

这些控制都是基于启发式规律以及模糊逻辑中的布尔变量或函数。例如启发式运行策略（根据车辆速度和所需转矩激活不同的操作模式）如图 5.2 所示。该类控制在实践中的应用非常频繁，如大众 twinDrive，参见图 6.103。

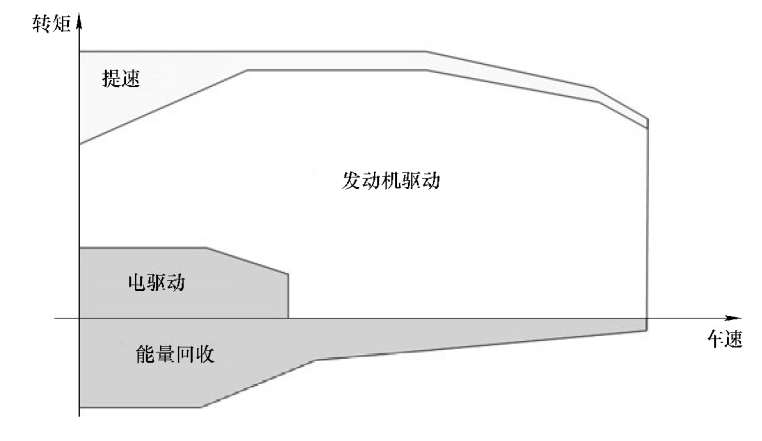


图 5.2 根据车辆车速和所需转矩激活不同的操作模式

除了选择相应的操作模块外，其他变量如电池的充电状态也会对各种输出变量产生影响。此外，还必须要遵守各种边界条件的约束，如电池寿命或过载容量等方面。

作为输入变量，对运行策略产生影响的很多标准和边界条件都可以通过使用模糊逻辑的加权函数来计算。在一般情况下，只有很少的硬性限制或阈值被限定。相反，判定输出变量以相应的加权函数为基础。

启发式控制策略的优点通常是比较容易理解和执行的。如果启发式控制策略应用非常协调，可以达到非常令人满意的结果（通常为最低油耗）。该类控制的缺点是选定的阈值对其表现产生影响。但在这种情况下，理想值可能根据当时的行驶条件发生变化。为了实现控制系统良好的稳定性和减少开支，往往开发以某模型为基础的控制方法。

在模拟行驶过程中，可通过运行策略对一台混合动力汽车进行基本判定。因此，在下一章节将详细阐述混合动力汽车的模拟行驶。

5.3 混合动力汽车模拟行驶

由于混合动力汽车具有较多组成部分和较高的自由度，在运行策略的计划选择、参数变化、操作设计等方面更为复杂，因此在传动链管理的研发中对整车进行模拟行驶测试意义重大。模拟行驶测试分为以下两类：

1) 准静态式：根据给定的速度和高度变化以及车辆数据可以计算出每个时间点需要的驱动力及能量流，同时通过综合特性曲线得出车辆的效率和损耗。借助准静态式可以对大多数非瞬态的过程进行充分准确地描述，如循环测试中基于综合特性曲线数据的能耗。

2) 动态式：该类模拟以使用微分方程从数学上对整个系统进行精确描述为基础，因此对动态特性描述尤为充分。该类模拟的费用虽然比准静态式模拟昂贵，但也可以提供驾驶性能和排放的测试结论。

一般情况下，在研发的第一阶段，即计划选择和参数筛选阶段，对整车纵向动力学模拟测试。与此有关的是，对适合的组件有尽可能详细的认识（建模），由传动链管理系统对每个组件的功能进行协调，其中也包括发动机、传动控制以及上一级车辆运行策略（如果存

在)。

通过变分法对各种系统之间相互协调进行优化和调整,因此可能显示出如车辆质量、电气元件的效率和蓄电性能等各种参数和特性对车辆总体性能的影响。

为了了解混合动力汽车的模拟测试,在此举例对模拟测试工具进行详细说明,用于进行数值计算的典型模拟应用工具有 Modelica/Dymola、MATLAB/Simulink、AVL – Cruise、GT – Drive 等。在以下列出的示例中将选择一个动态模拟方法并使用 Dymola 程序包。Dymola (动态建模平台) 是一个适用于各类物理系统的建模软件。通过 Dymola 可以创建按等级划分且可重复使用的模型,在此将采用一个以对象和方程式为基础的新建模方法。Dymola 同时也是按照能量流动进行建模。该程序使用预先构造的模型库内的元素,新模块可以通过内置的 Modelica 语言来创建。Modelica 是用于物理系统建模的一种面向对象的语言。该程序中可以创建 C 代码,该代码可实现与 Matlab/Simulink 或硬件回路 (HIL) 等平台建立联系。因此,剩余的且实际并不存在的混合驱动动力总成、整车及驾驶人可以在单个部件运行试验台上进行模拟。

下面章节所列的示例中,组件和策略库已经建立,由此可得出混合动力汽车在性能、油耗和排量相关的质量报告。

5.3.1 混合动力汽车建模

在此以并联式混合动力技术为例进行建模,如图 5.3 所示。电机在图 5.3 中位于发动机和变速器之间且可以接通离合装置 K1 和 K2 实现纯电动 (后轴驱动)、提速、制动能量回收和负荷点提升。

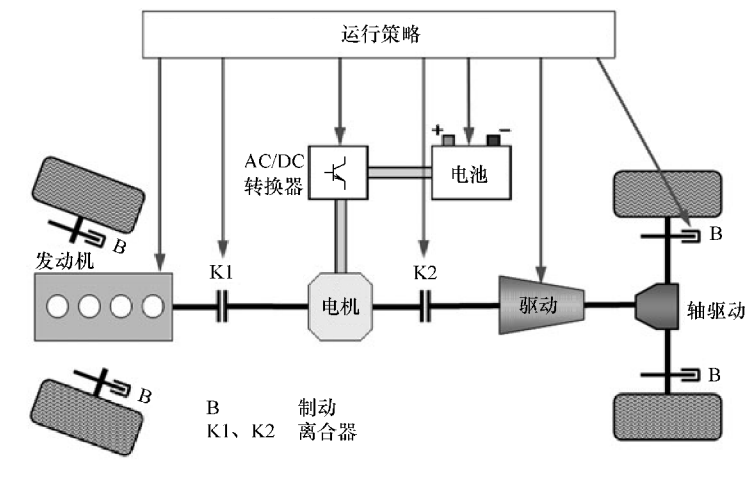


图 5.3 模式举例 - 并联式混合动力技术方案

图 5.4 所示为并联式混合传动链所含模型的系统图。下面将对该模型的每个部件进行简述。

机械连接 (旋转式)

图 5.5 所示为主要的旋转质量所属模块,并考虑到通过角动量守恒的转速变化。

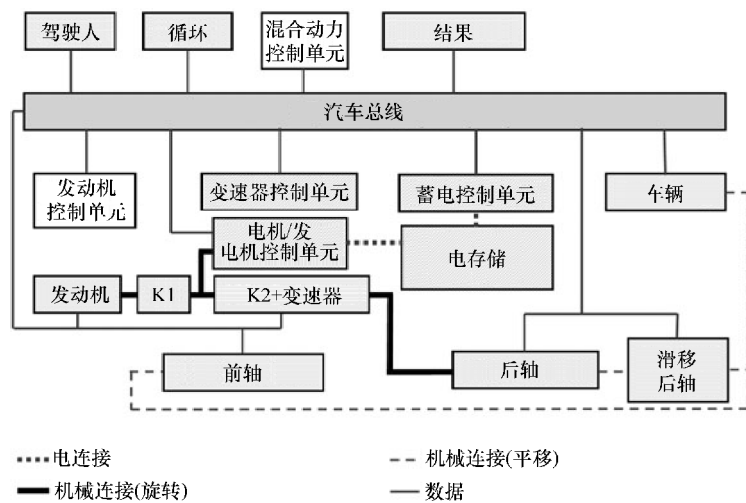


图 5.4 并联式混合动力传动链的 Dymola 模式

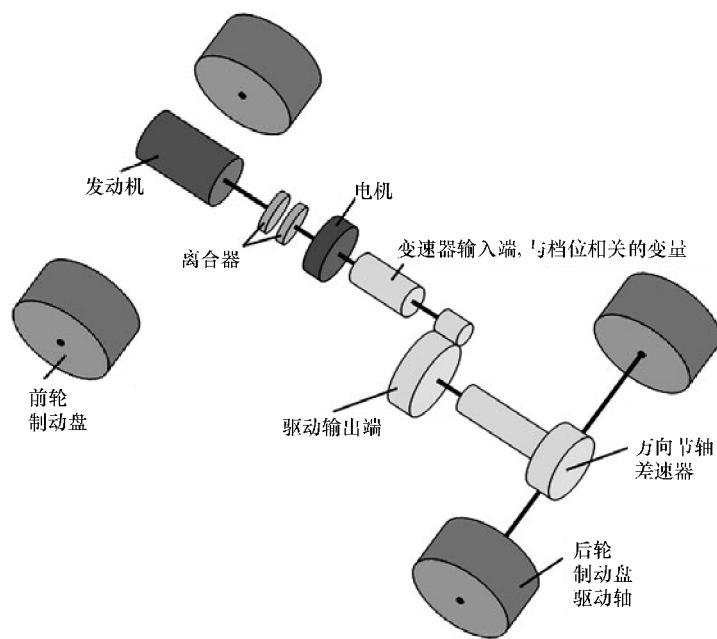


图 5.5 旋转质量的力学等效模型

驾驶人

为使该模型可以按照预定的速度曲线运行，有必要在模型中采用驾驶人调节器。该调节器作为一个 PI 调节器存储于模型库中。驾驶人作为一个闭合回路模型。在驾驶人闭合回路模型中，车辆速度是由加速踏板和制动踏板位置的输出变量来控制。由此可使车辆的行驶模式和实际的驾驶操作情况相似。在开放回路模拟中则无驾驶人模型调节器，而仅从各功能确

定和实施车辆的行驶特征及其行驶状态。

当前车速是由“车辆”模块通过车辆总线控制器传输至驾驶人模型。

循环模块在每个时间点给出设定速度，同时传送到车辆总线控制器，并由驾驶人模型在车辆总线控制器中进行读取。所设车速与瞬时车速之差由控制器输出数据确定。驾驶人调节器输出为负值导致对制动踏板进行操作，而输出值为正值时对加速踏板进行操作。当车辆要减速且踩下制动踏板时，加速踏板会自动回位，发动机根据离合 K1 的不同位置处于牵引运行、空转或关闭状态。牵引运行中，应考虑到发动机牵引转矩。当车辆加速时，制动装置完全开放。

为了避免静止车辆在坡路上下滑，驾驶人模型在车辆停止时对制动踏板进行操控。当车辆进入起动状态时，应及时松开制动踏板。在此要引入“半秒设定车速”值作为车辆起动触发信号，根据该信号驾驶人模型能及时松开制动踏板，车辆起步。驾驶人模型将加速踏板和制动踏板的位置传送到车辆总线控制器。

循环

每个行驶循环模拟由一个相应的行驶特性设定。对于继续运行某种行驶特性而言，下列传送给车辆总线控制器的变量是必要的：

所需的速度（取决于时间）、在半秒内所需的设定车速（取决于时间）、所需的档位（取决于时间）和车道倾斜度（取决于车辆滑动的距离）。

已知的用于车辆认证的行驶循环有新欧洲行驶循环和所谓的真实寿命循环（Real life cycle）已经作为循环被编程，作为真实的日常行驶反映，此外，还有满负荷加速和弹性测试循环。

HCU

HCU 指混合动力控制单元。该控制单元包含在车辆的整个运行策略中。HCU 的任务总结为以下 6 个方面：

- 1) 可用总转矩（发动机、电机）的测定；
- 2) 判断发动机的起/停工况；
- 3) 检测目前可能的工况；
- 4) 控制所有离合装置；
- 5) 判断负荷增加和负荷减小时的转矩，参见章节 5.3.2；
- 6) 将转矩分配到各个联动装置。

制动过程中，混合动力控制单元（HCU）所需要的制动力被分成一个再生部分和一个盘式制动部分。

结论

在这个模块中，数据的计算不直接用于模拟而用于评估。下列数据需要计算并传送到车辆总线控制器：百公里油耗、每公里排放（氮氧化物、微粒、烃）、电能传输速率（只在混合驱动模式下）、传动链工作效率。

车辆总线控制器

车辆总线控制器为各个模型中组件提供所需的信号，且无需分别发送信号。每个组件可通过连接获取车辆总线控制器中的所有信号。车辆总线控制器作为信号交换平台，即车辆总线控制器本身不对信号进行处理。与评估相关的所有信号也通过车辆总线控制器传送。其功能只在于信号的再加工，通过车辆总线控制器简化了每个数值的评估。因此在控制装置之间交流上，该总线系统与目前普遍应用于汽车技术的控制器局域网总线系统相似。采用该总线系统极大地简化了对各个硬件回路应用的调节。

车辆

该模块计算基于行驶阻力和驱动力的车辆加速度和轴负荷分配。驱动力的计算需考虑到的所有损失和传动链的惯性。行驶阻力是指每一种与车辆的行驶方向相反的力。行驶阻力包括以下部分：滚动阻力、空气阻力、倾斜阻力、平移加速阻力（旋转加速阻力由其他模块计算）。

滚动阻力为

$$F_R = f_R m_{\text{Fahrzg}} g \cos \alpha \quad (5-1)$$

式中 F_R ——滚动阻力 (N)；

f_R ——滚动阻力系数；

m_{Fahrzg} ——车辆质量 (kg)；

g ——重力加速度 (m/s^2)；

α ——倾斜角度 ($^\circ$)。

空气阻力为

$$F_L = c_w A \frac{\rho_L}{2} v_A^2 \quad (5-2)$$

式中 F_L ——空气阻力 (N)；

c_w ——空阻系数；

A ——迎风面积 (m^2)；

ρ_L ——空气密度 (kg/m^3)；

v_A ——流体速度 (m/s)。

倾斜阻力为

$$F_S = m_{\text{Fahrzg}} g \sin \alpha \quad (5-3)$$

式中 F_S ——倾斜阻力 (N)；

m_{Fahrzg} ——车辆质量 (kg)；

g ——重力加速度 (m/s^2)；

α ——倾斜角度 ($^\circ$)。

平移加速阻力为

$$F_{B\_trans} = \dot{v} m_{\text{Fahrzg}} \quad (5-4)$$

式中 F_{B_trans} ——平移加速阻力 (N)；

$\dot{v}$ ——车辆加速度 (m/s^2)；

m_{Fahrzg} ——车辆质量 (kg)。

计算行驶阻力需要的参数有车辆质量、测量数据、阻力系数等。此外，该模组可以推算出轴负荷。轴负荷包括一个动态部分、一个静态部分和一个受空气动力影响的部分。在此，滚动阻力的影响忽略不计。动态轴负荷描述的是由车辆结构或加减速中形成的载荷变化引起的轴负荷改变。静态轴负荷描述的是受车辆自重影响的在相关轴上的重力分配。轴负荷分配会被传送至车辆总线控制器。

滑移率

车轮通过摩擦将力传递到路面，因此需要在模拟中建立车轮滑移率模型。制动滑移和驱动滑移的区别在于一个车轮被制动还是被驱动。

制动滑移率为

$$S_{\text{brems}} = \frac{\dot{\varphi}_0 - \dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_0} \quad (5-5)$$

驱动滑移率为

$$S_{\text{treib}} = \frac{\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_0}{\dot{\varphi}} \quad (5-6)$$

式中 S_{brems} ——制动滑移率；

S_{treib} ——驱动滑移率；

$\dot{\varphi}_0$ ——无力矩影响的车轮角速度 (rad/s)；

$\dot{\varphi}$ ——受力矩影响的车轮角速度 (rad/s)。

车轮制动和加速滑移率用不同的公式表示，其结果为正值，也可能为0。传递到路面上的力由车轮的驱动转矩通过一个基于综合特性曲线的滑移率模型进行计算，并与轴负荷相关联。

后桥（前桥）（或称后轴/前轴）

后桥的模型考虑到万向节轴、车轮、轮胎、制动片和驱动半轴的惯性力矩，以及轴差速器的损失。此外，从混合动力控制单元（HCU）给出的制动指令由该模块进行转换。

发动机

对模型库中一个基于综合特性曲线的简单发动机模型进行一些相应的调节，通过基于综合特性曲线建模更换发动机是通过存储新的数据记录实现的。每台发动机的特征都包括下列数据：满载特性曲线、牵引转矩曲线、进气满载特性曲线、能耗特性曲线、排放特性曲线（氮氧化物、炭烟和烃类）、发动机惯性矩、空转能耗、空转排放（氮氧化物、炭烟和烃类）、气门开关性能（PT1 延迟转矩与综合特性曲线的时间常数）。

该模型被分成三个区域：

- 1) 从 HCU 中的发动机设定转矩转换为实际转矩；
- 2) 模拟涡轮表现；
- 3) 计算能耗和排放。

可通过发动机控制单元（ECU）对发动机模型进行控制。该控制单元描述的是发动机

上游控制器，其功能包括如起动发动机、空转时的转速控制和转速限制。

离合装置 K2 和变速器

该模块表现变速器以及离合装置 K2 之间的关系。变速器建模跟手自一体变速器 ASG 相似。跟 ASG 相同的是该模型带有预设的一定等级变速比，可根据定义的时间而自动换档。ASG 自动变速器的工作原理是离合装置自动耦合，触发器切换至所需传动比。变速器模型由变速器控制单元 GBCU (Gear Box Control Unit) 进行控制。

在此模拟中体现出部件的惯性矩、每个传动比的效率以及离合装置的摩擦关系。

此外 GBCU 还将接收以下信号：离合装置信号、将要切换的档位、所需变速比。

变速比变化的建模显示出一个特殊之处。在汽车技术中，换档即改变变速比，进而改变变速器转速输入。在实际行驶中，通过同步环准确协调转速。因为此同步过程在模型中未出现，在此变速比的变化表现为旋转质量转速的突变。这样会导致模拟中出现数值问题，因此无法实施。换而言之通过标准的无级变速器 (CVT) 进行换档。CVT 模型中改变传动比所需的时间短于手动换档的时间。手动换档的过程为离合装置打开、在设定时间点换档、离合装置闭合。由于在离合装置闭合时变速比已经存在，所以变速比连续变化对车辆无影响。

变速器控制单元 (GBCU)

GBCU 是模型化的变速器控制装置。其功能是选择换档策略、预先确定档位以及触发离合器闭合和断开。

离合控制单元 (CCU)

CCU 是集成在离合器内的控制装置。借助 petri 网可以对离合器每一个状态建模。包括下列状态：去耦（断开）、自由状态、不同的耦合策略（通过发动机起步、在电动行驶过程中起动发动机等）、耦合（闭合）。

蓄电控制单元 (EStorageCU)

该控制单元的功能是控制蓄电池。其作用在于将从蓄电池获得的数据传递给车辆总线控制装置。该控制单元还用于监控电池的最低和最满充电状态。此外，该模块还包括一个带功率限制的过载模型。

蓄电模型

该模型显示各种蓄电系统之间的关系。此处涉及模型库中蓄电池模型和一个超级电容模型之间的选择。电池模型包括镍金属电池和锂离子高效电池特性，超级电容模型包括一个双层次超级电容特性。还有一种简化的端子 - 数值模型，描述的是电池端子的性能。其特别适用于在模拟中的各种具体应用和整个系统。端子 - 数值模型理论上以实验模组或简化的等效电路图为基础。在等效电路图中必须注意的是，其参数并不恒定，且与电流、温度、充电状态和电池老化成非线性关系。如图 5.6 所示，电池模型中端子性能取决于 SOC。

以下数据将在模型中进行计算：当前电池充电状态、电池电压 (V)、电池电流 (A)、功率 (W)、最大充电功率 (W)、最大放电功率 (W)、 $U_{L(SOC)}$ 取决于电池充电状况的空载

电压 (V)、 U_{Batt} 电池端电压 (V)、 U_{SC} 超级电容端电压 (V)、 $R_{i(\text{SOC})}$ 取决于电池充电状况的内阻 (Ω)、 $R_{d(\text{SOC})}$ 取决于电池充电状况的动态电阻 (Ω)、 $C_{d(\text{SOC})}$ 取决于电池充电状况的动态电容量 (F)。

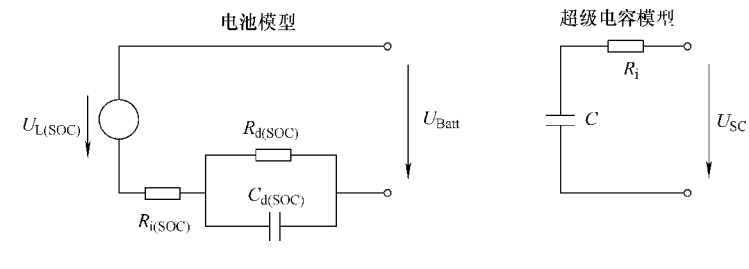


图 5.6 电池和超级电容的等效线路图

电机单元 (EUnit)

该单元是指电机、整流器和所属控制装置的建模，及电机控制单元 (EMCU)。通过该模型确定电机所需转矩，例如起动发动机所需的转矩。该模型对转子的惯性矩、电机的持续满负荷转矩以及时间相关的过载情况进行模拟。此外，还将得出表示电机和整流器效率的综合特性曲线。

5.3.2 运行策略举例

如在章节 5.1 中提到，本章节介绍车辆每种工况定义下的运行条件。接下来对图 5.3 和 5.4 所示并联式混合动力技术的启发式运行策略进行阐述。在该基础运行策略中不涉及舒适性和车内温度管理需求。

该技术原则上允许运行策略根据优先顺序激活下列运行模式。例如：纯发动机驱动排在最后表示其他运行模式不可运行时，才进行纯发动机驱动。

(1) 停车状态

- 1) 静止时负荷点提升；
- 2) 发动机停止运行（起/停）。

(2) 行驶中

- 1) 能量再生；
- 2) 负荷点提升；
- 3) 电动行驶（包括特殊情况“滑行”）；
- 4) 提速；
- 5) 纯发动机驱动。

停车状态负荷点提升

该运行模式的条件是，车辆处于停车状态且电池需要充电。其他条件视舒适性和安全性要求而定。该模式涉及停车状态下发电。因此只用于紧急发电。

停车状态负荷点提升模式下，发动机和电机之间的离合器闭合，且电机和变速器之间的离合器断开。

通过式 (5-7) 计算停车状态负荷点提升模式下的能效最高点

$$be_{\text{stillstand-LPA}} = \frac{be_{\text{VKM}} P_{\text{VKM}}}{P_{\text{VKM}} \eta_{\text{gen}} \eta_{\text{batein}} \eta_{\text{bataus}} \bar{\eta}_{\text{mot}}} \quad (5-7)$$

式 (5-7) 简化后为

$$be_{\text{Stillstand-LPA}} = \frac{be_{\text{VKM}}}{\eta_{\text{gen}} \eta_{\text{batein}} \eta_{\text{bataus}} \bar{\eta}_{\text{mot}}} \quad (5-8)$$

式中 $be_{\text{Stillstand-LPA}}$ ——计算出的用于发电和电力使用的能耗 ($\text{g/kW} \cdot \text{h}$);

be_{VKM} ——发动机在该工作点的比能耗 ($\text{g/kW} \cdot \text{h}$);

P_{VKM} ——发动机在特定转速和转矩时的功率 (kW);

η_{gen} ——转速为 n 且电机转矩为 M_{EM} 时电机的发电效率;

η_{batein} ——电池输入效率;

η_{bataus} ——电池输出效率;

$\bar{\eta}_{\text{mot}}$ ——电机用电预计效率 (如统计数据)。

根据舒适性和安全性要求, 限定转速和转矩极限直到允许停车状态下负荷点升高, 然后得出该转速极限内最有效的工作点。限制转速和转矩应避免车辆静止时产生噪声和排放过热气体。

发动机停止运行 (起/停)

停车状态下且发动机在空转时, 发动机将被关闭。该措施可在停车到重新启动的过程中大幅度降低油耗, 从而达到减排目的。

起/停 (发动机停止运转) 的条件: 踩下制动踏板; 车辆行驶速度低于 1km/h 。

能量再生

在常规机械制动过程中, 转化成热量的部分制动能可以通过回收转化为电能, 并暂时储存于电池中。在模拟中要考虑到行驶阻力和传动链产生的损耗会减少回收的能量, 如图 5.7 所示。

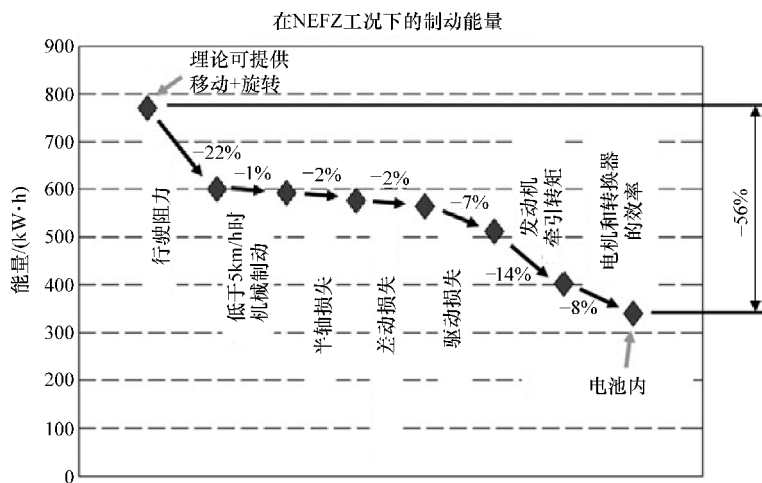


图 5.7 在新欧洲行驶循环工况下, 高档车辆可再生制动能量损失

每种能量回收的前提条件是电池的 SOC 必须低于所设最上限。该极限值取决于电池寿命,并根据电池技术和使用目的在 60% ~ 85%。能量再生有两种方式:常规制动和牵引特性模拟。

通过能量再生进行制动:

当驾驶人踩下制动踏板对车辆进行制动时,需要一定程度上减速,在电机发电过程中能产生制动转矩,所产生的电能传输到电池并储存。再生功率受电池最大输入功率限制。如果驾驶人需要更大的制动功率并用于发电,其功率差由机械制动装置作为补充。

通过能量再生进行牵引特性模拟:

当驾驶人松开加速踏板,由发动机的牵引转矩模拟车辆减速。然后发动机与电机去耦,同时电机获得一个相对应发动机的牵引转矩。模拟中该能量再生方式只出现在电动运行模式下。

满足下列条件时,可用再生能量进行制动:

- 1) 驾驶人踩下制动踏板;
- 2) 蓄电池允许继续充电;
- 3) 换挡离合器闭合;
- 4) 车速超过 1km/h。

当满足以上条件,借助发电机使车辆减速向蓄电池充电。

负荷点提升 (LPA)

负荷点提升时,电机用于发电。如图 5.8 所示,作为发动机驱动车辆所需转矩 $M_{\text{理论值}}$ 的补充,一个转矩将被传递至曲轴。由此可使发动机工作点移动至比能耗较低的区域。与常规动力总成不同的是发动机在负荷增加的情况下需要具有高于驱动车辆所需的功率。该多余的功率由发电机转化为电能,传输至蓄电池,以满足之后电力驱动的需要。根据其效率,对负荷点提升进行评估,必须注意该功率流。

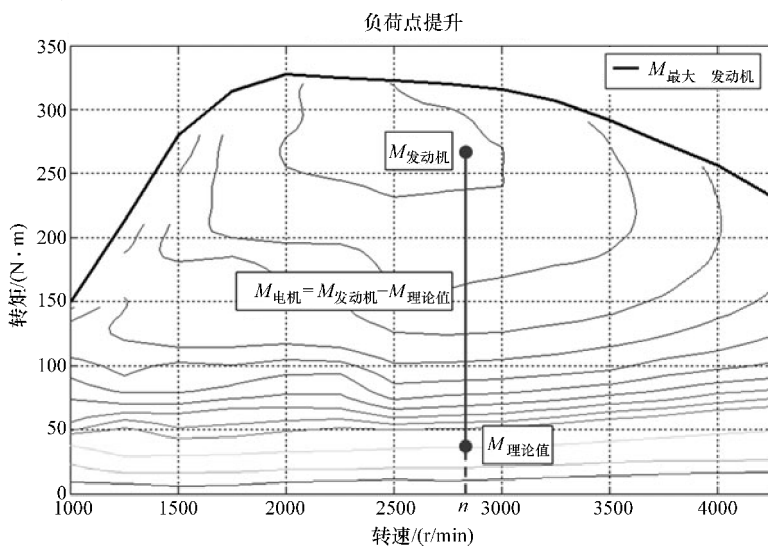


图 5.8 在恒定转速下负荷点提升的解释

如果负荷点提升可以提高动力总成的效率,就必须在比能耗低时,由发动机和电机产生,且转换用于车辆推进的功率与常规发动机(无电机)驱动等效。

通过下列式(5-9)计算常规动力总成的比能耗

$$be_{(konv)} = \frac{BE_{BP}}{P_{VKM}} \quad (5-9)$$

式中 $be_{(konv)}$ ——常规动力总成的比能耗 ($\text{g/kW} \cdot \text{h}$);

BE_{BP} ——发动机在工作点的绝对能耗 (g/h);

P_{VKM} ——发动机在工作点的功率 (kW)。

按照图 5.8,根据式(5-10)计算出一个负荷点提升的比能耗

$$be_{(LPA)} \big|_{n=kons} = \frac{BE_{M_{VKM}}}{P_{soll} + P_{EM} \eta_{gen} \eta_{batain} \eta_{bataus} \bar{\eta}_{mot}} \quad (5-10)$$

式中 $be_{(LPA)} \big|_{n=kons}$ ——在考虑到发电和用电,负荷点提升中的比能耗 ($\text{g/kW} \cdot \text{h}$);

$P_{EM} \eta_{gen} \eta_{batain} \eta_{bataus} \bar{\eta}_{mot}$ ——电机机械功率,之后将被电机根据效率分配给所有电动元件;

$BE_{(M_{VKM})}$ ——转速在 n 点时,发动机绝对油耗 (g/h);

P_{soll} ——转速在 n 点时,发动机功率 (kW);

P_{EM} ——转速在 n 点,且电机转矩为 M_{EM} 时,电动机功率 (kW);

η_{gen} ——转速在 n 点,且电机转矩为 M_{EM} 时,发电机发电效率(如综合特性曲线);

η_{batain} ——电池输入功率;

η_{bataus} ——电池输出功率。

$\bar{\eta}_{mot}$ ——电机在用电时的预计效率(统计数据)。

由于在目前的混合动力技术中,电动机直接连接发动机曲轴,因此电动机和发动机的转速一致。式(5-10)也可以用以下方程式表示

$$be_{(LPA)} \big|_{n=kons} = \frac{be_{(M_{VKM})} M_{VKM}}{M_{soll} + M_{EM} \eta_{gen} \eta_{batain} \eta_{bataus} \bar{\eta}_{mot}} \quad (5-11)$$

式中 $be_{(M_{VKM})}$ ——转速在 n 点时且电动机转矩为 M_{EM} 时,发动机的比能耗 ($\text{g/kW} \cdot \text{h}$);

M_{soll} ——所需的发动机转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$);

M_{EM} ——电机转矩,用于提高发动机负荷。

转速在 n 点时,负荷点提升的电动机转矩 M_{EM} 在给定转速下分别由发动机和电机的最大扭矩限定。

根据式(5-11)在发动机每一个工作点以及每个负荷点提升转矩 M_{EM} 计算 be_{LPA} ,得出每个工作点的通过提升转矩的“负荷点提升比能耗”。在特定工况下明确定义参数有:发动机要求的转速 n ;发动机要求的转矩 M_{soll} ;负荷点提升转矩 M_{EM} 。

图 5.9 所示为比能耗 be_{LPA} 随负荷点提升的变化过程。该曲线为特定发动机工作点下计算 be_{LPA} 。其目的是推导出最低比能耗(如图 5.9 中标记)。

如图 5.9 所示,横轴表示在发动机一个工作点上,电动机可能出现的负荷点提升转矩,纵轴表示比能耗 (be_{LPA})。水平直线为发动机在无负荷点提升时的比能耗,即 $M_{EM} = 0$ 。造成比能耗增加直至负荷点提升转矩约 $10 \text{N} \cdot \text{m}$ 的原因有:在该范围内,比能耗的优化不能抵

消该范围内很多能量转换损失，且因 M_{EM} 小则电机效率较低。

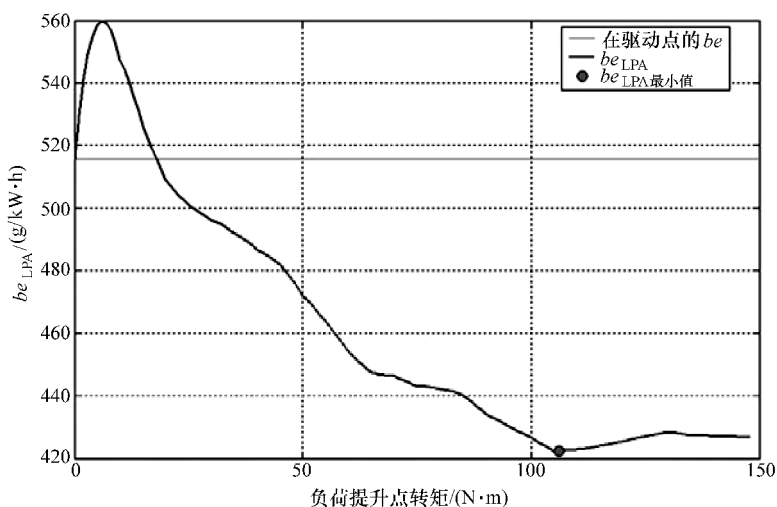


图 5.9 当发动机转矩为 $15\text{ N}\cdot\text{m}$ 、转速为 2000 r/min 时，有效率的负荷点提升体现比能耗和转矩

选择负荷点提升转矩以及相应的最低比能耗 be_{LPA} 作为运行策略（以图 5.9 为例负荷点提升电机转矩 $M_{EM} = 105\text{ N}\cdot\text{m}$ ，见图中标记）。行驶中转速 $n = 2000\text{ r/min}$ 时，当驾驶人踩下加速踏板产生 $15\text{ N}\cdot\text{m}$ 的转矩时，采用的运行策略为：发动机和电机的转矩在此工作点提升为 $105\text{ N}\cdot\text{m}$ 。该工况下产生的电能储存于电池中。

可以保证的是，当负荷点提升产生并储存的平均电量，在电机效率 $\eta_{\text{mot,betrieb}} \geq \eta_{\text{mot}}$ 时，就能提升效率，可根据式 (5-11) 进行计算。

$\bar{\eta}_{\text{mot,betrieb}}$ 为电机在相应工作点的效率； $\bar{\eta}_{\text{mot}}$ 为电机的平均效率。

该评估的一个优点在于： $M_{EM} = 0$ 的特殊情况在此可作为另一种方案，即发动机在无负荷点提升状态下工作。该特例简化了数据分析，其原因在于可以免去对发动机每个工作点上的最小比能耗 be_{LPA} 与发动机常规比能耗之比较。在图 5.10 中所选择的发动机工作点，在该点上负荷点提升导致油耗增加。负荷点提升状态下的比能耗 be_{LPA} 总是大于发动机比能耗，因此当转矩 $M_{EM} = 0$ 时，即常规发动机（无电机驱动）驱动时，负荷点提升比能耗最小。

图 5.11 为发动机（水平面上）的所有工作点的三维视图，该视图表明在提升负荷时，哪些转矩发生变化， be_{LPA} 可提高发动机工作效率。

在 $X-Y$ 水平面上的浅色区域表示：发动机在负荷点提升时的所有工作点。该区域内产生的转矩为 M_{soil} 与 M_{EM} 的和。在 $X-Y$ 水平面上的曲线为发动机的最大转矩。

此外，图 5.11 还显示出发动机只在一个狭窄的范围内获得一次负荷点提升。由此可知，上述负荷点提升策略预设的参数是为了使发动机达到比常规驱动更佳的比能率。

如果急需电能给电池充电，例如几个满负荷加速后，可以激活负荷点提升，同样也适用于无法降低油耗时。该情况下，对负荷点提升所产生的电流进行“成本计算”（类似于上述的计算），从而得出一个具有最低额外消耗的负荷点提升转矩。

满足下列条件时，负荷点提升被激活时，其中包括：

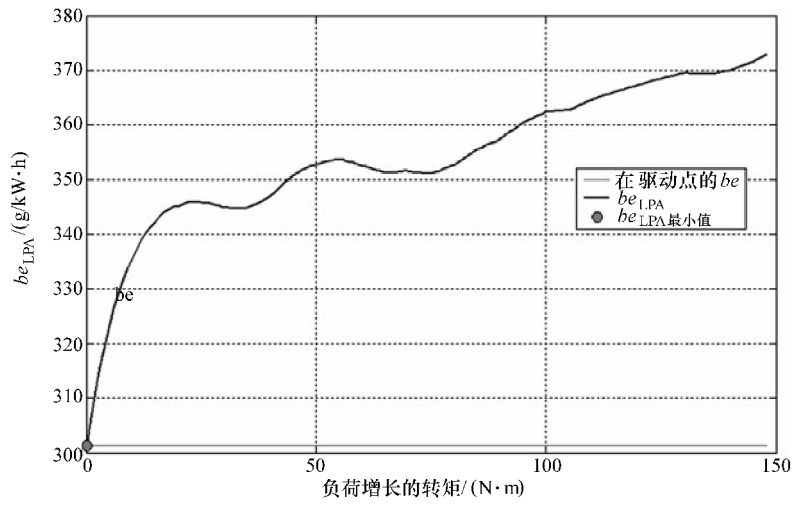


图 5.10 在发动机工作点上，无效率的负荷点提升体现比能耗转矩

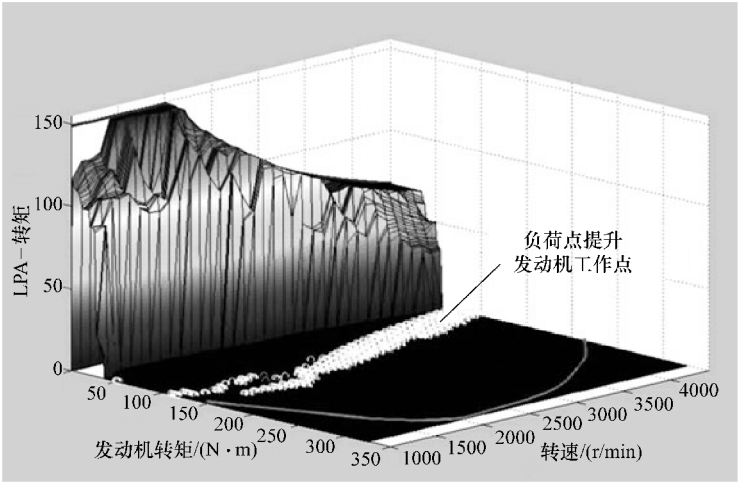


图 5.11 发动机工作区间负荷点提升时转矩的走势

- 1) 蓄电设施未完全充电；
- 2) 制动踏板松开；
- 3) 对瞬时工作点而言，如果当下能量流动上具有意义或由于急需电力支持，负荷点提升就是必要的；
- 4) 发动机已起动。

电动（电动行驶）

在电动行驶模式下，为了达到驾驶人理想的行驶状态，所需功率只由电机提供，而非发动机。图 5.12 表示了在某些范围内允许运行策略中的电动行驶模式。该范围位于电机最大

转矩的曲线和负荷点提升范围之间。在电池电量充足的前提下,也可以在该区间内以纯电动行驶。

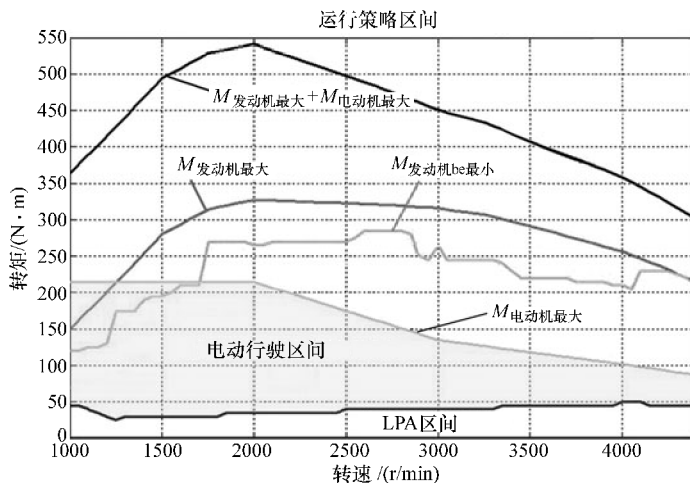


图 5.12 电动行驶的运行策略区间

以下为电动行驶的重要前提:

- 1) 最大可用电机转矩大于理想行驶状态所需的转矩;
- 2) 蓄电池电量充足;
- 3) 所需的电功率可以由蓄电池提供;
- 4) 制动踏板松开。

电动行驶的一个特殊情况是所谓的滑行。该情况下,传动链不由主动驱动装置带动,即发动机和电机驱动都不工作。

提速

提速过程中,在变速器输入轴上除了有发动机的转矩 M_{VKM} ,还有一个由电机提供的额外转矩 M_{EM} ,如图 5.13 所示。该额外的转矩与发动机转矩的作用方向一致,并为发动机转矩提供支持。可以弥补起步时动力不足,如可为涡轮增压赢得时间,或在通常情况下达到较高的驱动转矩。由于该功能只有在电池电量充足时可以实现,电动行驶模式必须保证,对驾驶人而言一直可重复加速性能。该运行策略的一个例子是 AVL 涡轮增压混合动力,本书将在第 6.12 节进行详细介绍,

另一方案,电机的附加转矩也可用于发动机负荷点降低情况下,使发动机的工作点进入比能耗低的范围内。例如,当所需理论转矩大于最低能耗对应的转矩时,同时电池电量充足,发动机保持在最低能耗的工作点,所产生的转矩差额由电机填补,如图 5.13 所示。因此必须考虑到发电和用电的效率链。

激活提速最重要的标准如下:

蓄电池电量充足,且所需转矩大于当前转速下发动机提供的最大转矩,或所需转矩大于最佳油耗对应的发动机转矩。

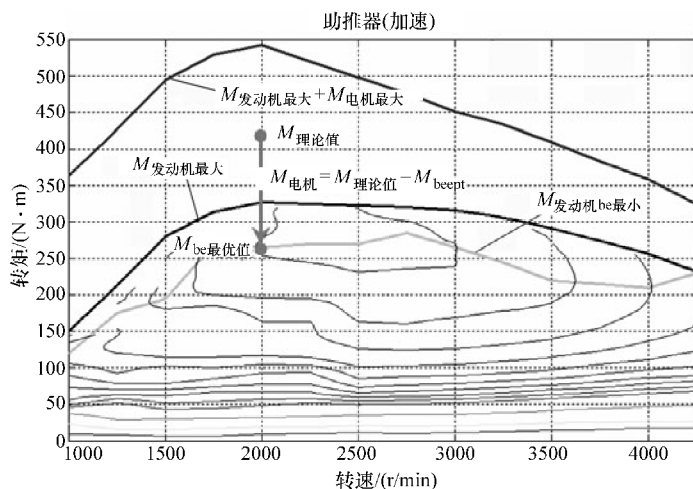


图 5.13 提速原理

纯发动机驱动

只有当所有混合模式不可操作甚至操作无效时，才由发动机为混合动力车辆的动力总成提供动力。综上所述，当出现以下情况时，由纯发动机进行驱动：

- 1) 车辆处于非静止状态；
- 2) 无负荷点提升（LPA），其原因是工作点位于 LPA 范围之外或无需用电；
- 3) 无法实现电力驱动；
- 4) 无法实现提速操作。

5.3.3 电器元件参数选择

作为模拟模型应用的例子，如图 5.3 和图 5.4 所示并联式混合动力技术所得出的计算结果将在本章节中进行阐述。此外，电动组件的特性发生改变，目的是显示一个不同的参数选择对评价变量（加速性能和能耗）产生的影响。传动链应采用小型化技术，即如果常规车辆采用 6 缸 3L 柴油发动机，那么在同等大小的混合动力车辆上采用 4 缸 2L 柴油发动机，同时配备不同功率的电动机。混合动力车辆的差速比和传动比在该研究中不发生改变。接下来，根据新欧洲行驶循环标准，对混合动力车辆从 0 ~ 100km/h 满负荷加速过程中的加速性能和能耗进行评估。

为了研究异步电机（ASM）在不同持续输出功率下对混合动力系统的动力总成产生的影响，将对 3 台功率分别为 10kW、20kW 和 30kW 的异步电机进行测试。因为对于以下变量计算，这 3 台异步电机已由同一台设备进行标示，如图 5.14 所示，3 台异步电机的过载性能相同。所采用的例子不包异步电机的热力学模型。为了得出电机过载性能，将最大过载时间设置为 10s。

应该提到的一点，该过载功率直到达到异步电机弱磁范围时可将持续输出功率几乎提高

到 5 倍。只有达到弱磁范围后，该功率相应的转矩才会回落，参见章节 4.2.1。

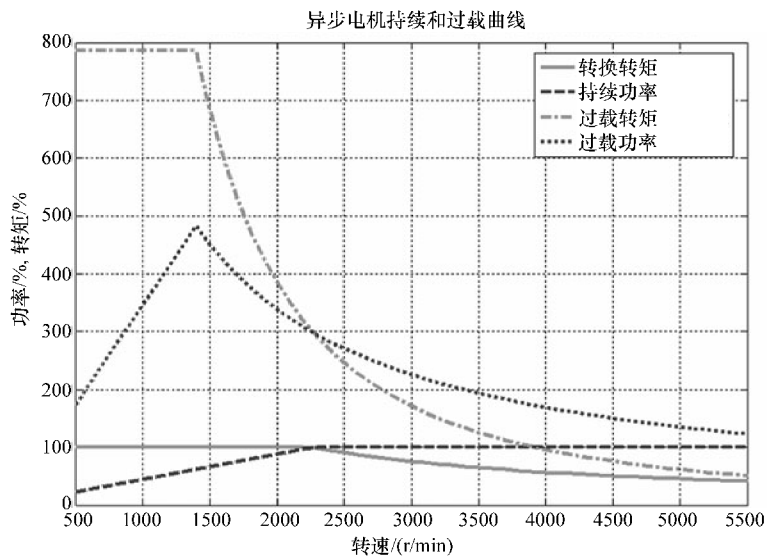


图 5.14 异步电机的持续和过载特性

蓄电池的蓄电量及其对应重量应该作为第二个重要变量进行研究。就车辆性能和初级能源消耗而言，比能量和比功率是衡量蓄电池技术的重要参数。在模拟测试中采用的是带不同数量电极板的镍氢电池，见表 5.1。如果通过增加电极板的数量增加电容量，在同样的比能量和比功率下，从而最大限度地增加功率输出或功率消耗的最大值。功率输出或功率消耗对加速或制动尤其重要。

如前所述，充分利用异步电机的过载性能潜力对满载加速度进行预测。因此有必要对蓄电池从设计上改进，开发其供电的潜力。如表 5.1 所列，镍氢电池也可过载工作，而由于散热原因，只能在很短的时间内工作。在大多数情况下，异步电机过载时与过载的电池相比，电机部件达到热临界。由于该异步电机根据上述规定只有 10s 可以在过载运行，因此电池最大过载是固定的。图 5.15 表述了在从 0 ~ 100km/h 的满负荷加速过程中，并联式混合动力技术中与速度相关的电机理论电功率消耗、电池和等质量超级电容模组（SC 136 模组）的最大功率。

表 5.1 运用中的镍氢电池参数

极板数	镍氢电池			
	28	42	56	70
额定电压/V	201.6	302.4	403.2	504.0
最大持续放电电流/A	80	80	80	80
最大持续充电电流/A	80	80	80	80
最大过载放电电流/A	120	120	120	120
最大过载充电电流/A	80	80	80	80

(续)

	镍氢电池			
能量单位/kW · h	1. 31	1. 97	2. 62	3. 28
最大持续功率/kW	15. 66	23. 49	31. 32	39. 14
最大过载功率/kW	21. 87	32. 81	43. 75	54. 68
质量/kg	38	54	70	86

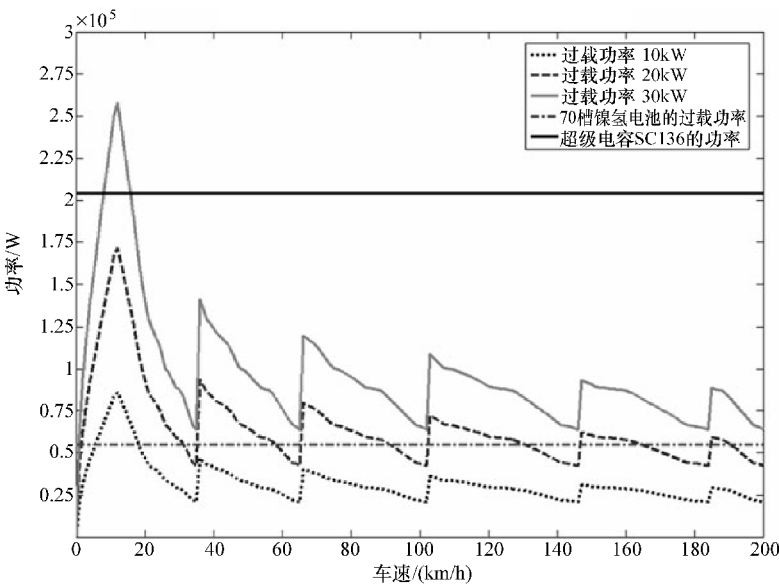


图 5.15 满负荷加速情况下，模拟组件在过载驱动时的吸收及释放电功率

图 5.15 显示出换档过程中 3 台异步电机功率消耗的增长。所得出的结论是，在一次换档过程中，异步电动机的转速明显降低，由此达到最佳的过载性能。在此出现的过载电功率峰值不能被电池所覆盖。图 5.15 也表示带 70 个电极板的镍氢电池的过载容量及等质量超级电容模组（SC 136 模式）的功率参数。

作为上述情况的另一种表示方法，图 5.16 给出从 0 ~ 100km/h 的满负荷加速所用的时间。以满负荷 100% 作为基础，图中数值为常规 6 缸 2L 柴油机车车辆相关参数。混合动力车辆各配备 4 缸 2L 柴油机和 10 ~ 30kW 的异步电机。如图 5.16 所示电池不是以型号而是以重量进行区分。

从表 5.1 和图 5.15 明显可见，模拟的电池不可能在过载工况下为不同的异步电机提供充分的电力支持。该情况下，性能越好的异步电机质量越大，表明了 10kW 的异步电机对应最小的电池为模拟变量最佳选择。电池容量越大，10kW 的异步电机过载运转越久，效率降低越多。由此得出，跟其他两台异步电机相比，电池容量越大，10kW 的异步电机可提供的功率最小。由于在不同异步电机重量上的差异显著，配备 20kW 的异步电机及电池提供电力支持的传动链具有最佳输出功率质量比，从而提供最好的性能。

模拟结果表明，通过电机和电池的最佳配置，具有相对较低的电功率的混合动力车辆几乎可达到配备大功率发动机的中级车辆从 0 ~ 100km/h 的加速度。

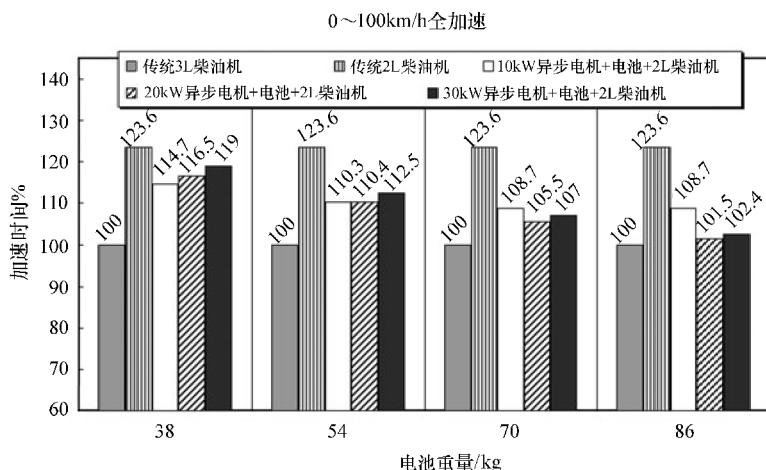


图 5.16 不同的并联式混合动力在 0~100km/h 满负荷加速时间比较

下一组评估数据——在新欧洲行驶循环测试中，通过不同变量计算油耗。计算中，注意保持电池充电状态的平衡，即该循环开始和结束时电池电量相等。从图 5.17 可以明显看出，小型化的混合动力总成在新欧洲行驶循环中的能耗大大低于中级轿车，当然持续功率也较低。用 2L 柴油机取代 3L 柴油机，仅此一个改变，可将油耗降低至 86%，即省油 14%。加上混合动力技术，可降低 35% 的油耗。电池大小的变化表明，较大的电池在功率和容量方面的优势与其过重的重量相互抵消。异步电动机的功率越大，其省油的优势在新欧洲行驶循环中更明显。在计算中，额外对与电池同等重量的超级电容进行模拟。该模拟可以尽量利用能量再生的潜力，尤其是通过功率较大的电机达到尽可能低的油耗值。

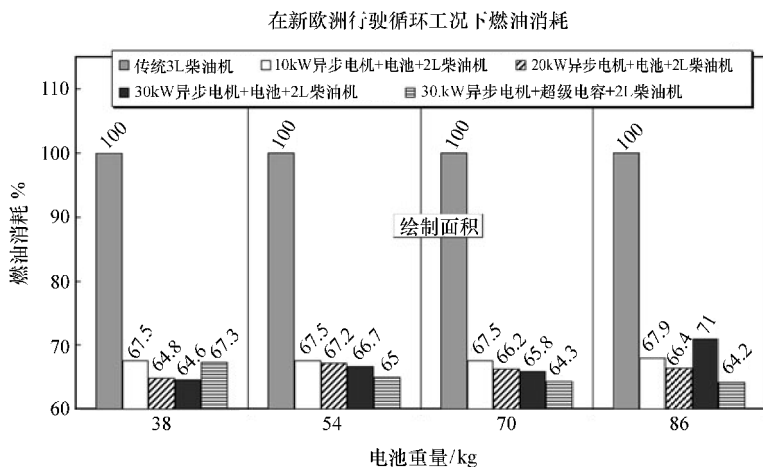


图 5.17 在新欧洲行驶循环工况下不同混合动力的油耗比较

上述例子为简单的参数选择，同时也显示出各部件参数选择的复杂程度。在实践中，必须考虑到各种评价参数、要求、应用领域等，因此，如不通过详细的建模和模拟无法得出最佳解决方案。

5.3.4 热管理对运行策略的影响

如前所述，混合动力汽车的各个行驶模式由运行策略确定。在本章节中将通过一个例子说明的各种运行策略对油耗的影响。在该例子中应在除上述的输入变量外，发动机温度也将包括在内，以得出在热运行阶段中哪种行驶模式下预热最快。

混合动力车辆的附属部件如整流器、电动机和电池都会产生损失，该损失的形成是因为这些部件都必须通过适当的冷却系统散热，以保证其工作温度保持在各自的温度极限值内。这些具有冷却循环的部件组成冷却网，并把热流引到发动机冷却系统，这样比较理想。

以一辆重 1885kg 的常规 SUV 为基础，配备图 5.18 中所示的电器元件，由此打造出一辆重 2045kg 的全混合动力汽车。通过功率为 147kW 的汽油机和功率为 35.5kW 的电机之间的离合器 1，使该车辆可实现纯电动行驶。通过离合器连接自动变速器。镍氢电池的容量为 2.6kW·h，电压值为 400V，最大输出功率为 48kW，最大输入功率为 32kW。电池电量为 20% ~ 80% 时，可以进行充电。

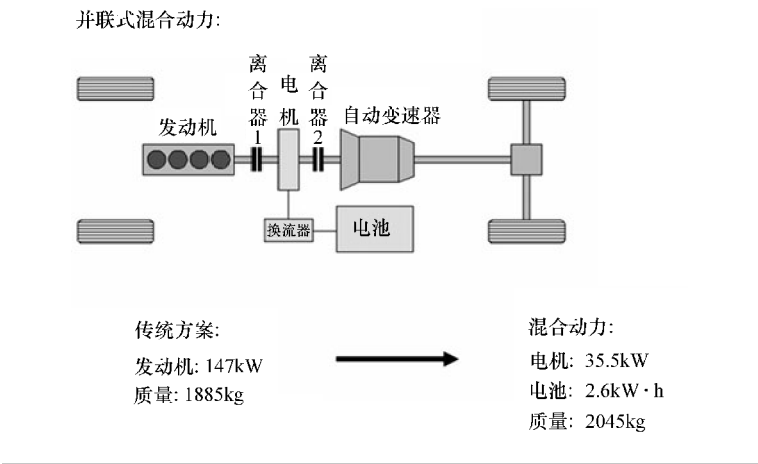


图 5.18 传动链系统图

在该混合动力总成中，可以对以下运行模式进行操作：

- 1) 起/停：当车辆静止时，发动机关闭；
- 2) 回收制动能：回收制动时的动能；
- 3) 负荷点提升：提升发动机负荷至一定工作点，通过电机的发电功能实现更低的比能耗；
- 4) 发动机关闭时，进行电力驱动；
- 5) 提速：电机为发动机提供动力支持；
- 6) 纯发动机驱动：在电机停止工作时，由发动机提供所需的转矩。

通过一个智能运行策略激活上述模式，由该车辆当前工况、瞬时负荷需求以及电池电量作为输入值，以最低油耗作为目标值。通过能量再生和负荷点提升产生并储存在电池内的电能，在电动行驶过程中被消耗掉，该过程与电池充电状态紧密相关，所以电池充电状态滞后被定义在 60% ~ 80%。滞后曲线向上，允许进入负荷点提升模式。当滞后曲线向下，该模式被禁止，从而进入电力驱动模式。

引入热管理系统的目的在于监控和管理各部件在每种运行模式下的热态，同时在车辆模拟模型中记录相应部件升温的状态以及温度变化过程。导致各部件升温的原因在于能量转换过程中产生的损失。造成发动机升温的原因除了摩擦以外，更主要的是燃烧室壁的热损失。各个部件根据部分热容量进行分类，部件之间热量可以通过热阻进行交换。热容量和热阻的值用测量结果进行校准。热量记录通过相应的综合特性曲线来表示。反之，相应的综合特性曲线中所示热损失以及效率也反映各个部件当前的温度。

在动力总成模型中集成了温度模型之后进行新欧洲行驶循环的测试。采用上述基础运行策略的混合动力汽车的油耗为 7.05L/100km，较常规车辆的油耗为 9.08L/100km 降低了 22.4%。图 5.19 为所模拟的两款车辆的温度变化曲线。

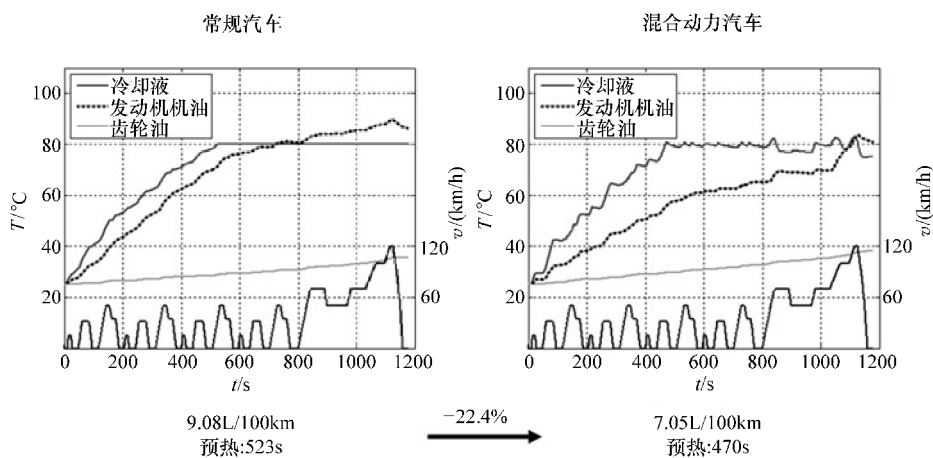


图 5.19 常规汽车和混合动力汽车的温度变化对比

快速预热运行策略——冷却循环回路无交联

首先，发动机和电动机的冷却循环系统无交联，两部件之间就不产生热交换。在预热周期中，尝试只通过重新选择运行模式来达到省油的目的。预热中，应优先选择提升发动机负荷的功能。在达到工作温度之前电力驱动被禁止，除非电池电量已经达到 80%。

静止状态下负荷点提升在此过程中作为辅助功能。因此发动机和电动机之间的离合器 1 闭合，离合器 2 断开，如图 5.18 所示。该功能下，车辆静止时发电机发电，之后用于电动行驶。由于电能 在 电池 充放电过程中必须进行传输，因此其比能耗比同工作点且无中间储电的情况要高：

$$be_{\text{Stillstand-LPA}} = \frac{be_{\text{VKM}}}{\eta_{\text{gen}} \eta_{\text{batein}} \eta_{\text{bataus}} \overline{\eta}_{\text{mot}}} \quad (5-12)$$

式中 $be_{\text{Stillstand-LPA}}$ ——所得出的用于发电的能耗 ($\text{g/kW} \cdot \text{h}$)；

be_{VKM} ——发动机在该工作点的比能耗 ($\text{g/kW} \cdot \text{h}$)；

η_{gen} ——转速在 n 点时且电动机转矩为 M_{EM} 时，发电机发电效率；

η_{batein} ——电池输入效率；

η_{bataus} ——电池输出效率;
 $\bar{\eta}_{\text{mot}}$ ——电机用平均效率。

当电能用于电动行驶,而取代比能耗较高的发动机行驶和负荷点提升,其结果降低了比能耗。通过选择相对较高的负荷点,进入发动机的热量更多。图 5.20 是根据式(5-12)得出的比能耗特性曲线,包括车辆静止时负荷点提升的工作界限。电机的使用使效率得到优化,从而可使优化的整个动力系统达到较高的转速(2850r/min),该转速对于静止的车辆而言偏高。因此,在模拟中,该运行模式的转速设定为 1500r/min,在该转速下的最佳转矩为 113N·m。

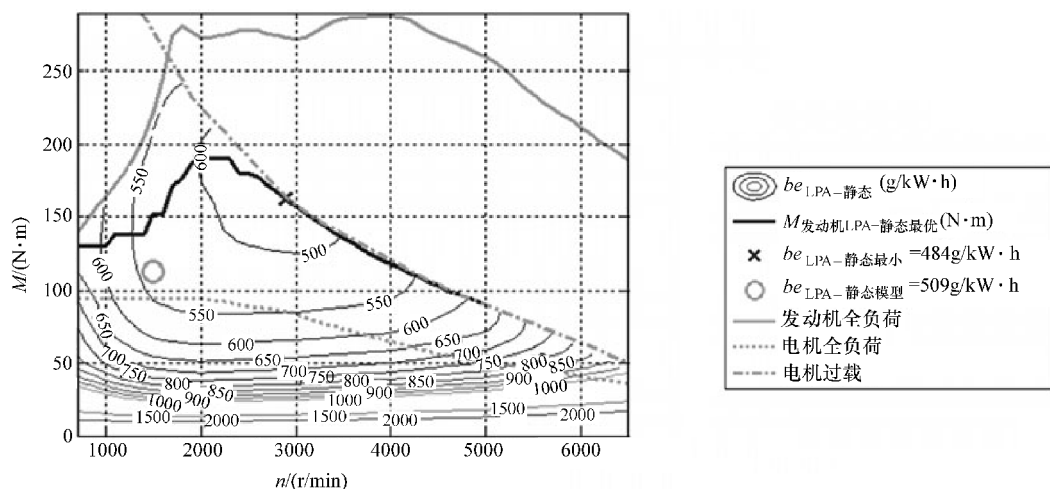


图 5.20 静态时发电的能耗场图

图 5.21 将车辆静止时负荷点提升与基础运行策略进行了比较,与起/停系统的基本变量(图 5.21 标为“参考”)相比,200s 达到静止状态下负荷点提升。这导致了冷却液和机油升温更加迅速。200s 后充电电池充电状态达到上限值,因此从该时间点起由电动行驶取代负荷点提升,即便冷却液的工作温度尚未完全达到。450s 后,操作模式达成一致,因为在这种情况下基础运行策略也达到电池电量上限。

因此,首先是更快加热到接近工作温度。余下的阶段温度增加较慢,因此对油耗的影响较小。快速达到冷却液工作温度只可能通过高容量电池实现。预热速度可以在负荷点提升模式下通过选择发动机转速进行调整,因此转速轻微的提高也能通过降低比能耗而提高整体效率。

在此运行策略下,油耗与之前给出的数据相比再次降低 2.1%,达到 6.90L/100km。此外,改善了低温下车内供暖的性能。

快速预热运行策略——冷却回路交联

在另一种运行策略研究中,发动机和各电器部件的冷却回路相互交联。在起步阶段只采用电力驱动,并且通过电器部件排出的热量来预热发动机。当电池充电状态低于定义的阈

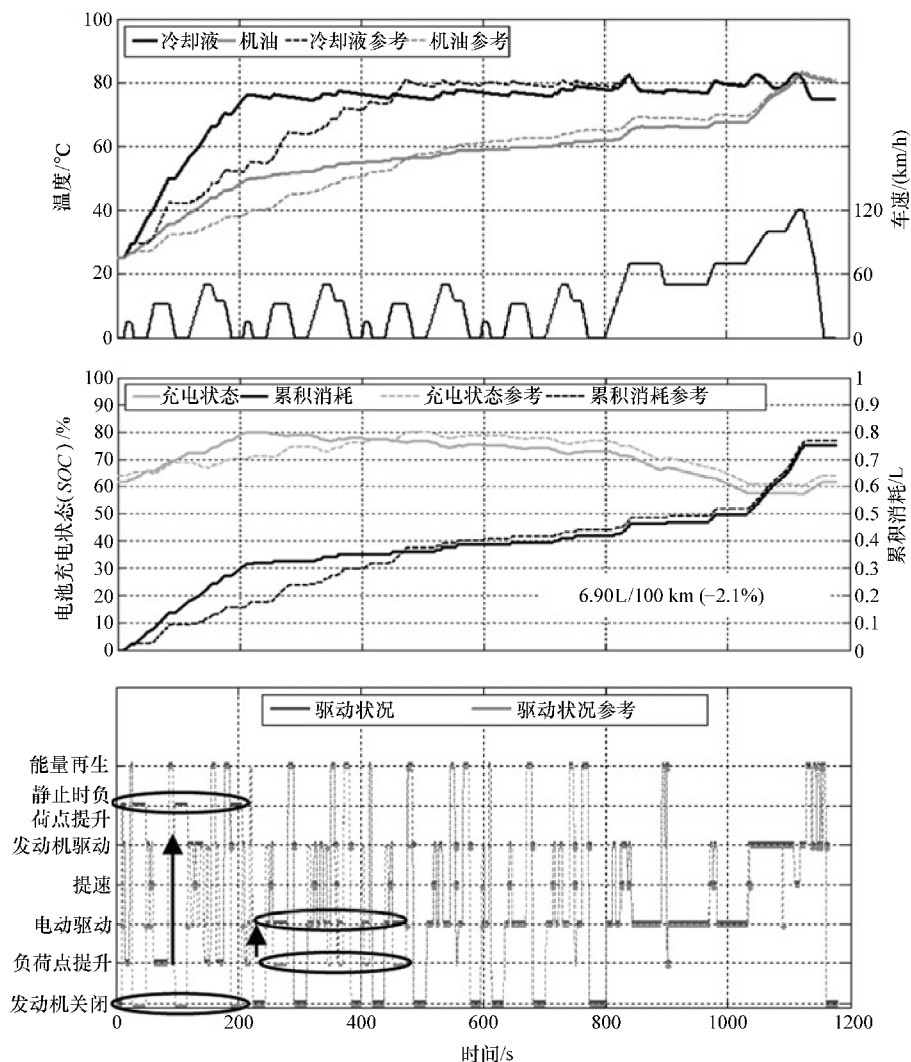


图 5.21 新欧洲行驶循环中的温度变化、充电状态和累积消耗
对比运行策略“静止时负荷点提升”和基础运行策略

值，或驾驶人的瞬态要求转矩超过电动机的最大转矩，此时冷却回路被分开，并起动发动机。

电器部件的温度将通过其自身的冷却器和冷却液泵来控制。图 5.22 表明，通过这种预热的方法只能在极小程度上提高发动机的温度，即 3.5°C 。该情况主要是因为采用了功耗低的电器部件。只有在加速过程中的阶段产生 4kW 的峰值损耗，而持续行驶中，其功耗约 1kW 。这些损失的热量被释放到冷却液中之前，首先必须为电动机预热。发动机起动后，温度在车辆静止状态下负荷点提升及行驶过程中迅速上升。负荷点提升也为电池充电。

在该运行策略下，油耗为 $6.94\text{L}/100\text{km}$ ，比第一种运行策略多耗油 1.6% 。发动机预热部分油耗由于温度升高的幅度小反而偏大。该策略大致上与上一种策略相同，唯一的区别在于其电动行驶的时间延迟了。

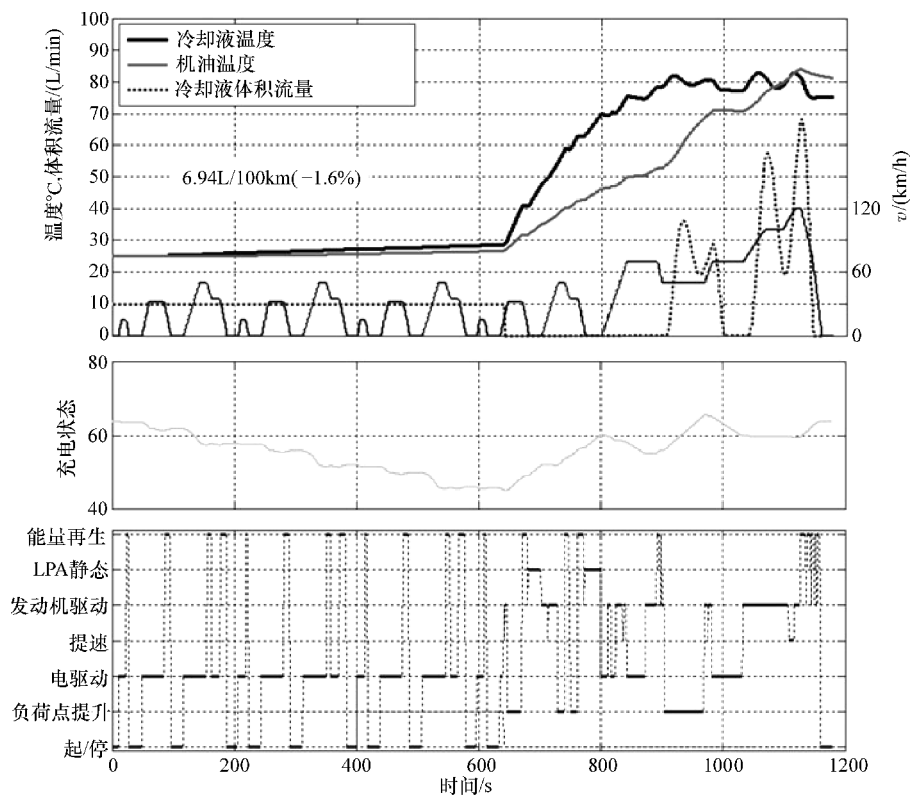


图 5.22 新欧洲行驶循环中，发动机在起动和预热后，电动行驶时的温度变化

该例子表明，热态对油耗不可忽略的影响，并因此应该被包括在建模和运行策略之内。此外，必须注意废气排放的影响，因为发动机各种功能的切换阈值和某些特性曲线的阈值与温度相关。

5.4 前瞻性运行策略

确立运行策略中的困难在于，在控制上难以辨认出行驶过程中的负荷谱，参见章节 5.2.1 所介绍的运行策略分类。这在电能储存管理中是最基本的，因为例如电池满电量的情况下不允许能量再生，相反电池电量过低不允许提速。因此需要开发一系列技术，使之可根据车辆内部信息对行驶循环中的速度及高度特征进行在线预测。在此基础上，运行策略可以计算出车辆随后所需的功率和油耗，同时提前采取措施，以达到更高效的行驶。该系统技术的前提在于根据独特的转向盘角度信息、数据库中所存路段行驶记录及其相应的速度及高度特征对当前行驶路段进行识别。

除了提高效率以外，通过预测可对牵引电池充放电大致上进行调整，使其输入和输出功率不超过行驶循环所给定的平均值，而该平均值直接影响温度变化特性，从而影响电池的使用寿命。

原则上需要对前瞻性的驾驶人辅助系统与行驶路段识别技术进行区分：

前瞻性的驾驶人辅助系统

其特点在于，该系统可以通过路段数据库和车辆周围环境识别对接下来的路段和交通状况进行预判。车辆周围环境一方面可通过车辆内置传感器如激光传感器、雷达传感器或图像处理传感器进行识别，另一方面可通过基础设施数据源如交通测量回路进行识别。数据库中的信息针对的是路段信息，即已知的速度限制、高度特征、弯道状况等。当前和未来的前瞻性辅助系统包括：第二代导航系统和电子地图、适应性巡航控制（ACC）、交通标志识别、车对车通信。

此处出现的问题并不是该系统技术上的可操作性，而是其一是否可应用于所有车辆类别，其二新建相应基础设施是否适用于车辆通信。由于该辅助系统增加了额外费用，所以很可能将暂时只装配在高档车辆上，且不属于量产设备。

此外，某些系统如导航系统由驾驶人进行操作或激活。因此，也可能出现只是对于经常行驶的和熟悉路段，导航系统的路段导航来开启，因此不可能完全预测余下路段的情况。

行驶路段识别和预判

行驶路段识别和预判技术基于两个方面，其一是根据特殊的路段信息识别行驶过的路段，其二是以数据库内存档的该路段车辆行驶速度和高度的数据为依据进行预测，并加以利用。根据德国联邦交通、建筑及住宅部的统计，一个普通的德国人在一个工作日驾车行驶约4个路段。图5.23所示为日常出行目的。因此，据推测，大部分重复行驶的目的是如上下班，购物或休闲活动，因此在这些路段的行驶较为频繁。

图5.24表示了预测系统技术以及将该技术和运行策略相结合，作为混合动力车辆控制能量流的手段。使用标准化的传感器信号记录路段信息。在进行路段识别后，运行策略获得的预判信息将得到下一步处理。

作为用于识别路段车辆内部传感器信号，转向盘角度在行驶路段中作为一个重要的值。转向特征通过正负偏转和以行驶点为基准的右转或左转对一个路段进行描述。弯道长度和弯道半径由信号持续的时间和信号的振幅表示。图5.25对两次行驶在同一路段中的车辆转向盘角度信号变化进行了比较。该信号在行驶的同时标绘出来，以避免由交通状况引起的在同一路段实时转向盘角度的混乱变化。如图5.25所示，该信号只能通过选定不同停车位作为起点或终点相互区别。

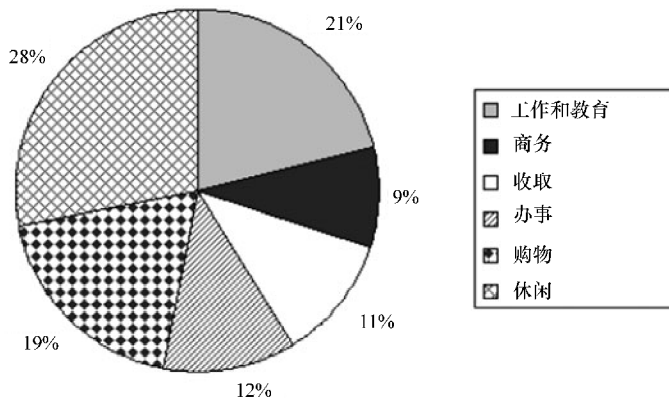


图 5.23 德国人出行目的

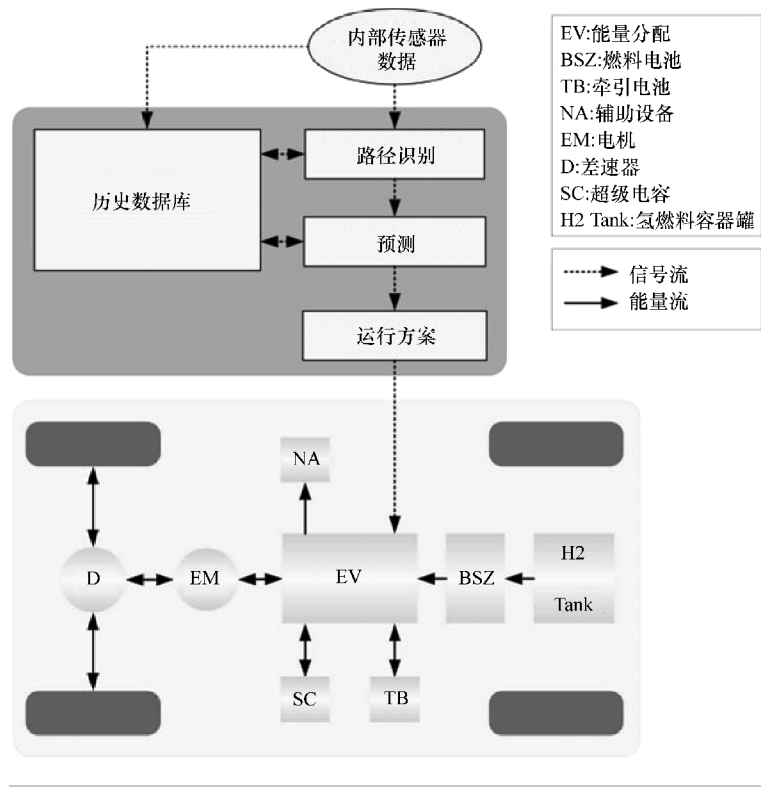


图 5.24 路段识别和预测的方案

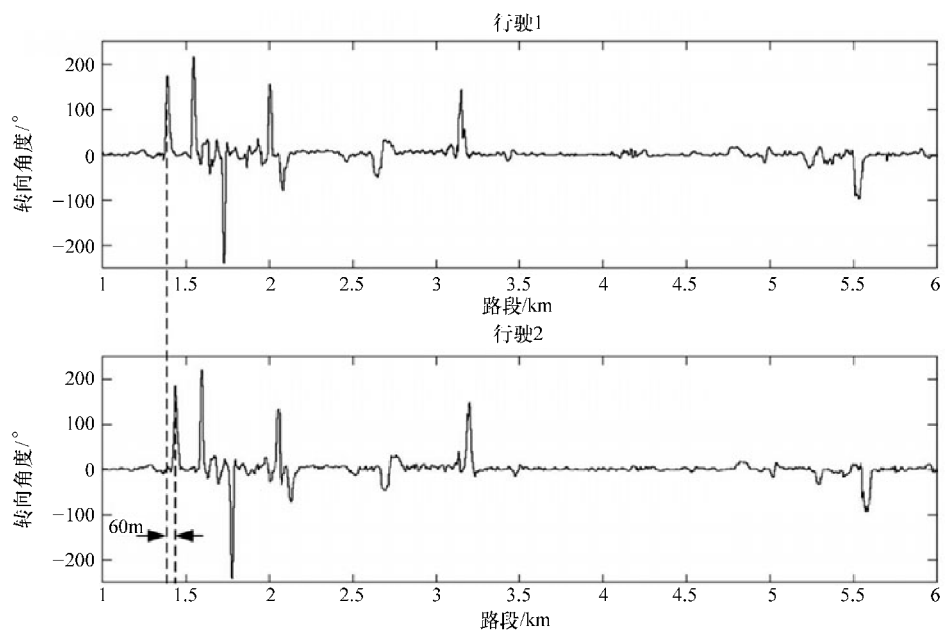


图 5.25 相同路段下两次行驶所得到的转向盘角度变化

如图 5.26 所示,一条路段可以通过转向轮转角信号,确定对弯道的预测和转向盘转动幅度、弯道的长度 $\Delta S_{\text{弯道}}$ 以及弯道之间的距离 $\Delta S_{\text{直线}}$ 来定义。

比较与路段识别算法相似的转向盘角度信号,并分析振幅高度和长度以及它们之间的距离等。当第二个弯道被探测出来,该算法在当前行驶状况下才开始进行测试。该比较并非局限于存储在历史数据库中的路段的头两个弯道,因为如前文提到,起点或终点可能由于停车位位置的差异而出现不同。为了提高路段识别的质量,可以对更多的弯道和直线进行测试。由此产生一个缺陷,首先需要行驶一个较长的路段,才能进行路段识别算法。因此,路段识别的提前程度和识别质量之间的协调是必需的。

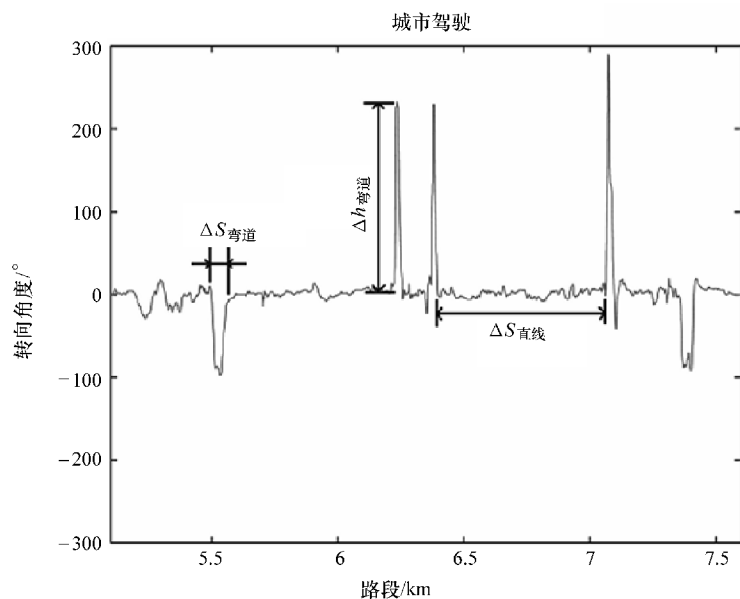


图 5.26 转向盘角度信号特点

路段识别之后,应基于对应的已存速度矢量,对剩余路段的代表性速度进行预测。由于交通流量的不可预知性以及上述系统存储空间的原因,将采用基于概率的方法对速度进行预测。此外,根据速度矢量,在每个行驶点选择使用最频繁的行驶速度。如果同一行驶点同时出现速度且概率相同时,那么选择与上一个行驶点最匹配的速度。此外还可以减小速度级之间的过渡。图 5.27 显示了实际的速度变化、预测的速度、预测的加速及减速阶段。

目前,获得的速度预测运用于运行策略,其主要目标是避免由于充满电的电池,导致能量再生没有得到再利用。这使在进入加速和减速阶段之前引入提前调节措施进行能量分配成为可能。提前调节,例如,通过辅助设备(包括电子空调压缩机、车载电网)进行放电,以便更好地利用再生的电能。

利用能量再生的模拟结果显示,与无预测功能的运行策略相比,运行策略中采用前瞻性预测信息将改善再生能量潜力增加了 3% ~ 7%。

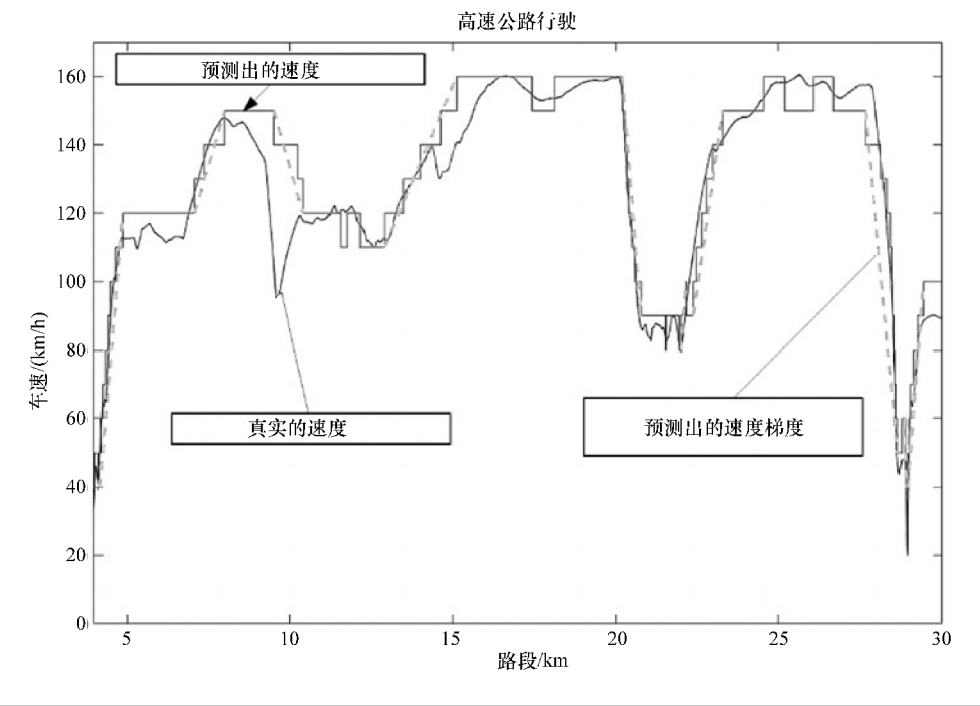


图 5.27 高速公路上行驶时的速度变化预测

轿车和摩托车 混合动力方案详解

第 6 章

6.1 丰田普锐斯

丰田普锐斯是最著名的混合动力汽车，该车于 1997 年 10 月首先在日本上市。2001 年丰田在美国和欧洲推出普锐斯修订版即第一代普锐斯，之后于 2003 年推出第二代。图 6.1 为前两代普锐斯。截至 2010 年已经推出了第三代。



图 6.1 丰田普锐斯第一代（左）、第二代（右）

丰田普锐斯的特殊之处在于其原创的混合动力传动链。目前串并联混合动力技术一般是建立在常规车辆传动链上，通常在变速器前方集成一个电机，而丰田普锐斯具有一个全新研发的传动链。

丰田混合动力系统（THS）由一台 4 缸汽油发动机、一套行星齿轮机构、一台起步电动机/发电机、一个整流器和一组高功率蓄电池组成，并且是所谓的功率分流混合动力总成。图 6.2 描述了传动链的结构，图 6.3 是电功率分流变速器的剖视图。

发动机通过扭振减振器与行星变速机构的行星架相连。发电机位于行星机构的太阳轮上，其功能是起动发动机，并为电动机和蓄电池提供电力支持。发电机直接与齿圈啮合，在电动行驶和倒车时进行驱动。除此之外，发电机也在加速过程中对发动机进行支持，并在制动时将再生电流存入蓄电池。行星齿轮作为一个叠加变速器，齿圈通过变速器直接与差速器的输出轴相连。因此，在齿圈的转速与车辆的速度始终成正比。

发电机、电动机和蓄电池构成一个共同的高压电路。第一代普锐斯的电压为 274V。THS II 通过一种新型高压电路可使发电机和电动机的工作电压提升到最高 500V。因此，电动机可在较低的电流条件下完成功率输入和输出，从而提升效率。普锐斯第二代的蓄电池电压仅有 202V。图 6.4 所示为普锐斯从第一代到第二代在高电压电路的结构变化。此外，高压电路通过 DC/DC 转换器提供 DC 12V 车载电压。

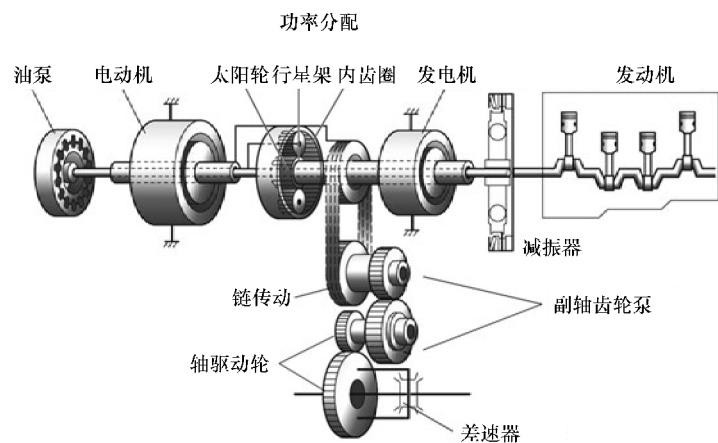


图 6.2 丰田普锐斯的传动链

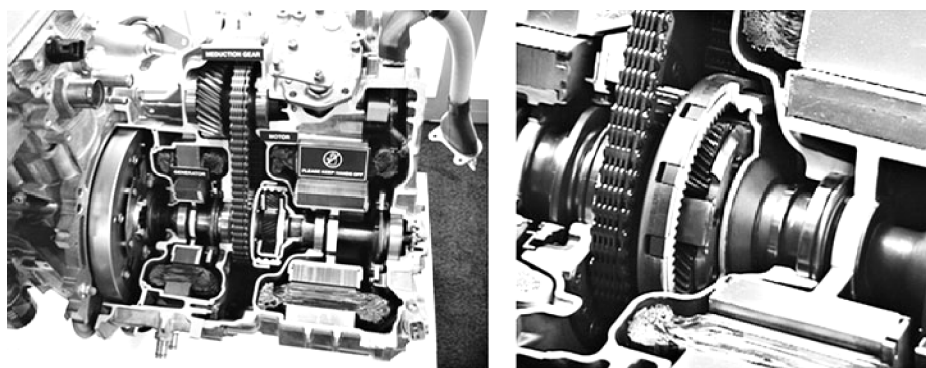


图 6.3 具有电动机及行星齿轮的电功率分流变速器剖面图

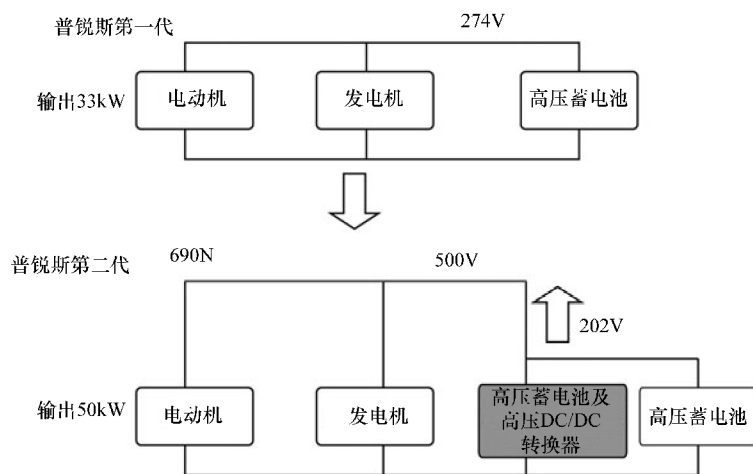


图 6.4 高压电流循环（普锐斯第一代和第二代）

如图 6.5 所示普锐斯的空冷式电池位于后座后的行李舱内。普锐斯第一代的蓄电池还有 38 个棱柱形模块，每个模块具有 6 个串联的电极板，第二代模块的数目减少至 28 个，通过优化电极连接和热管理方案使提供的电能保持恒定。

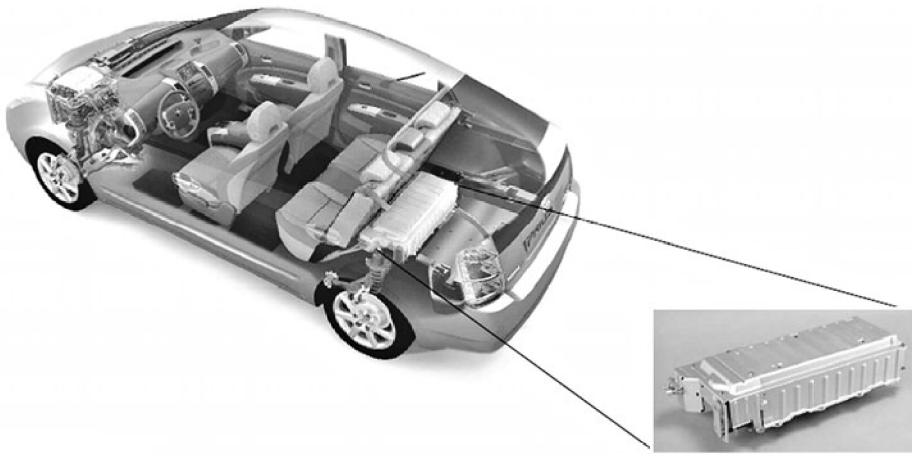


图 6.5 丰田普锐斯第二代

在表 6.1 中列出了 THS I 和 THS II 的技术细节，包括车辆性能和油耗值。

表 6.1 THS I 和 THS II 的技术参数及性能和油耗

	第一代，1998 年（日本）即 THS I	第一代修改版，2001 年即 THS I	第二代，2003 年即 THS II
发动机	INZ - FXE		
类型	四缸、直列汽油机、阿特金森循环，双顶置凸轮轴，每缸四气门技术，VVT - i 技术，电子直喷燃料，液冷		
缸径和行程/mm	75.0 × 84.7		
气缸排量/L	1.496		
最大功率/(kW)/(r/min)	43/4000	53/4500	/5000
最大转矩/(N · m)/(r/min)	102/4000	115/4200	115/4200
压缩比	13.5:1	13.0:1	13.0:1
电机	AC 永磁式同步电机液冷		
最大功率/kW/(r/min)	30/940 ~ 2000	33/1040 ~ 5600	50/1200 ~ 1450
最大转矩/(N · m)/(r/min)	305/0 ~ 940	350/0 ~ 400	400/0 ~ 1200
最大系统电压/V	275	275	500
蓄电池	镍氢电池		
极板	圆形	矩形	矩形
模块电压/V	7.2	7.2	7.2
额定容量/A · h	6.0	6.5	6.5

(续)

	第一代, 1998 年 (日本) 即 THS I	第一代修改版, 2001 年即 THS I	第二代, 2003 年即 THS II
模块数	40	38	28
模块重量/kg	75	56.3	45
整个系统 (最大发动机和电池功率);			
最大功率/kW/车速/(km/h)	—	74/120 或更高	82/85 或更高
85km/h 时功率/kW	—	65	82
最大扭矩/N·m/车速/(km/h)	—	421/11 或更低	478/22 或更低
燃料消耗	根据 1999/100/EG		
市区/(L/100km)	—	5.9	5
郊外/(L/100km)	—	4.6	4.2
综合消耗/(L/100km)	—	5.1	4.3
CO ₂ 排放量/(g/km)	—	120	104
车辆性能			
最高车速/(km/h)	—	160	170
加速时间 0~100km/h (s)	—	13.4	10.9
重量			
空车自重/载量/kg	—	1260/385	1375/350
行李舱空间/L	390	410~1210	

发动机已经根据混合动力汽车的要求重新设计。该发动机具有非常高的压缩比 ($\epsilon = 13.5$), 并根据阿特金森循环运行, 见图 6.6。理论上, 高压缩比在部分负荷下表现出省油的优势, 见图 6.7, 然而, 爆燃问题造成效率降低以及高负荷下可实现的转矩变小。为了解决这个问题, 进气凸轮轴调节至迟闭方向。进气门关闭非常晚, 一部分进气在压缩过程中再次排出, 使有效压缩比降低, 见图 6.6。

通过 VVT-i 系统 (凸轮轴有智能可变气门正时系统) 使进气门的闭合时间为 $80^{\circ} \sim 120^{\circ}$ (下止点), 从而使效压缩比可在 4.8~9.3 之间进行调节。在这种情况下, 通过 13.5 的膨胀比达到相对较高的热效率, 并通过降低有效压缩比降低爆燃趋势。图 6.7 为平均有效压力下的热效率。随着膨胀比升高和进气迟闭, 效率提高到 14.7 的膨胀比。图 6.8 显示为满负荷的范围热效率与可达到的平均有

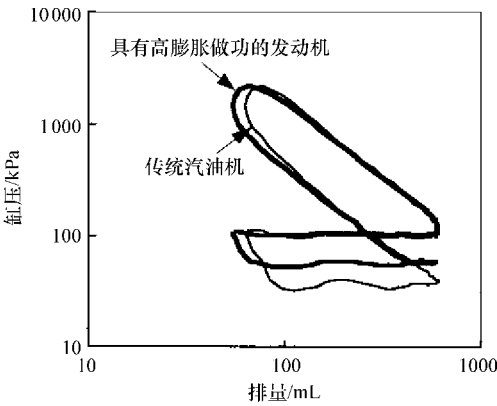


图 6.6 传统汽油机和阿特金森循环的 $p-V$ 图的对比

效压力。为了达到高效率，降低爆燃趋势，进气门迟闭。然而，这导致平均有效压力相对较低。

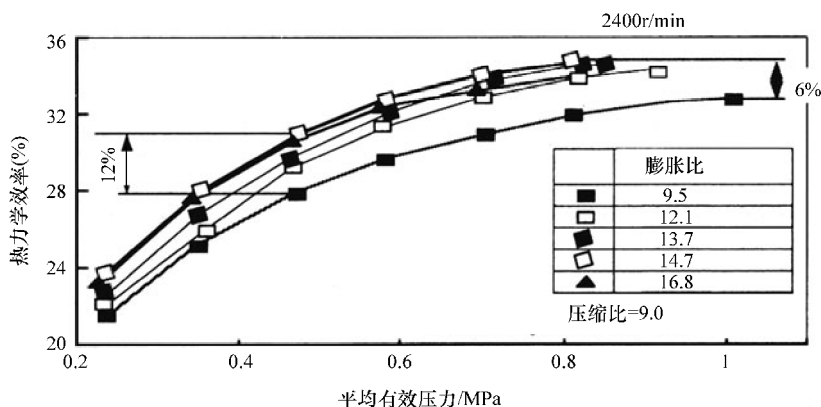


图 6.7 不同膨胀比对应的平均有效压力的热效率

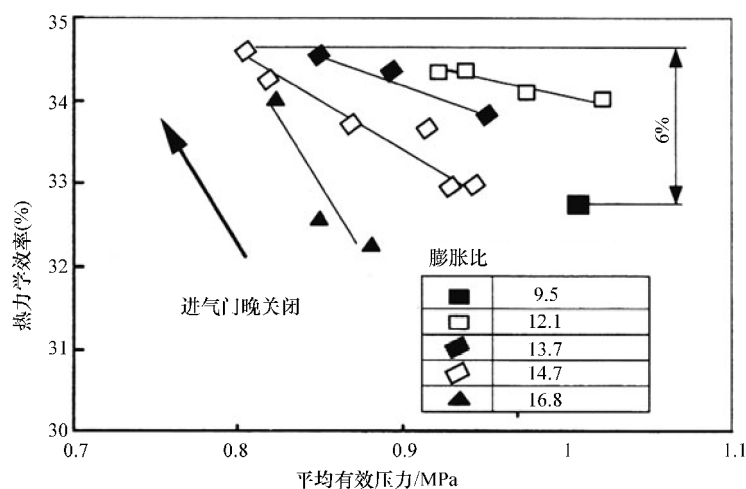


图 6.8 全负荷时不同膨胀比的效率和可达到的平均有效压力

与传统的 1.5L 发动机相比，产生的额定数据较低，5000r/min 转速下功率为 57kW，4200r/min 转速下转矩为 115N·m。由于普锐斯第二代的紧凑化和轻量化的曲轴、连杆、低摩擦活塞环和较小的气门弹簧，发动机最高转速被限制在 5000r/min 以下。

由于采用进气迟闭方式起动发动机，可以在起动时减小振动，增加舒适度。

正如在章节 2.3 中提到的，普锐斯的动力总成成为功率分流式，允许在一定范围内自由选择发动机的转速。该策略是现在根据场图设计成在沿着轨迹图上的工作点运行。图 6.9 所示为新欧洲行驶循环。因此，发动机在尽可能高负荷范围运转，同时达到较低的比能耗。

在美国，丰田为普锐斯第二代发动机的冷却回路配备了一个带 2.5L 冷却剂的蓄热器。该技术是普锐斯为满足冷起动排放 AT-PZEV（先进技术部分零排放车型）的要求研发的。

作为进一步的创新，普锐斯第二代用电动的空调压缩机取代了常规的传动带驱动空调压

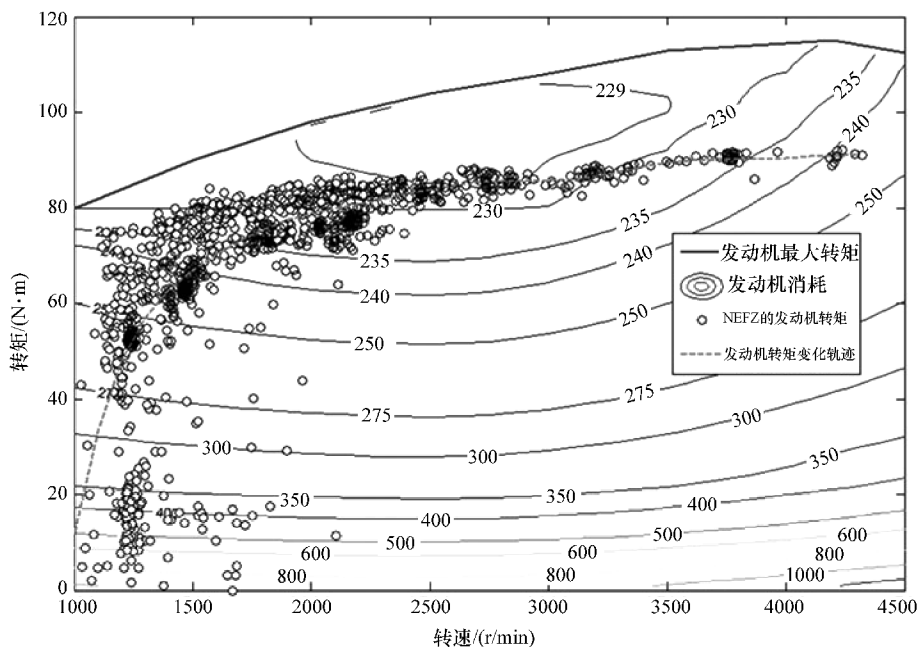


图 6.9 新欧洲行驶循环下的发动机工作点及相对的推导轨迹

缩机。另外，普锐斯第二代具有可由驾驶人选择的 EV 模式（电动车模式），在电池电力充足且低供暖或空调需求低的情况下，在低速要求下实现纯电动行驶（轻踩加速踏板），在 50km/h 的速度以内可行驶的距离达 2km。在更强劲的加速或更高速度要求的情况下，发动机将自动启动。

为了更好地理解电功率分流变速器内部元件的关系，图 6.10 给出变速器的剖面简图，并给出齿轮的齿数。发动机与行星齿轮架相连，并以速度 n_2 旋转，电机 1 与太阳轮以 n_1 的速度旋转，电机 2 输出端与差速器连接，并在齿圈上的轴以 n_3 速度旋转。齿圈轴到车轮传动轴的减速比为 3.905（普锐斯第一代）或 4.113（普锐斯第二代）。

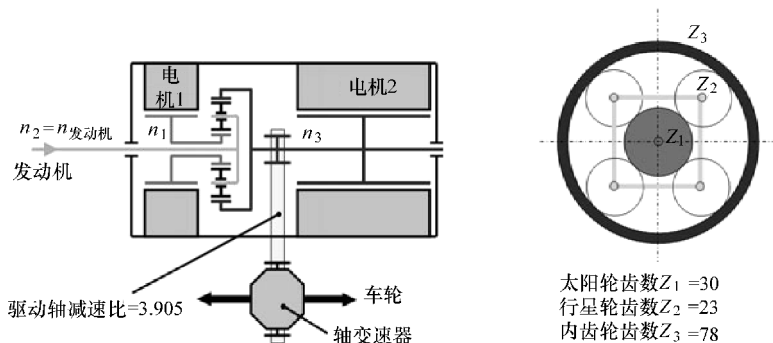


图 6.10 具有双电机及齿行星双驱动系统的简图

根据行星齿轮变速器的齿数，得出与发动机转矩 M_2 相关的转矩关系为

$$\frac{M_1}{M_2} = -\frac{z_1}{z_1 + z_3} = -\frac{30}{30 + 78} = -0.2778 \quad (6-1)$$

$$\frac{M_3}{M_2} = -\frac{z_3}{z_1 + z_3} = -\frac{78}{30 + 78} = -0.7222 \quad (6-2)$$

发动机有 72% 的转矩直接输出到变速器，只有 28% 到达 EM1。根据该转矩比与相应的转速得出传输的功率。转速 n_3 与车速 v 成正比，该比值取决于驱动轴减速比和驱动轮的滚动周长。在最大速度 160km/h 时，EM2 (n_3) 的转速为 6000r/min。图 6.11 给出了在各种行驶条件下的发动机转速与车速之间的关系。以下 6 个驱动条件显示在图 6.11 中：

- 1) 通过 EM2 起动车辆 - 发动机的转速通过一个适当的转速 n_1 。由于发动机不产生转矩，电机 1 旋转也无转矩。
- 2) 电力驱动速度为 50km/h 以内，适当地调整转速 n_1 。
- 3) 起动发动机时，EM1 (n_1) 的转速为 0 或为正值。发动机接入时，EM2 的转矩降低，以使总转矩保持恒定，车辆不会产生晃动。

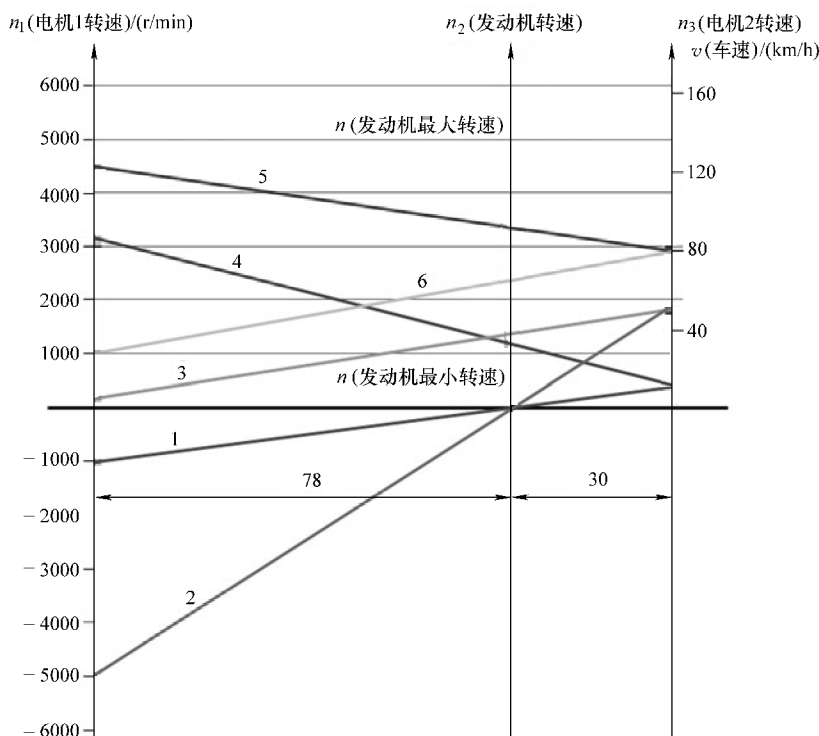


图 6.11 电驱动切换至混合驱动过程中，发动机转速和车速的关系

- 4) 通过发动机起动车辆，此时 EM1 转速较快是必要的。
- 5) 中速行驶和低功耗的要求。
- 6) 匀速行驶，但需要的功耗较高。为了增大功率，发动机转速增加，并且转矩沿图

6.9 所示的轨迹点变化。

与图 6.11 相对应的是, 图 6.12 为高速行驶时发动机转速和行驶速度的关系。如果电机 EM1 旋转方向改变, 产生无功功率, 参见章节 2.3, 又出现 3 种典型行驶状态:

- 1) 以最快速度和最大功率行驶。
- 2) 以最快速度和平均功率需求行驶, EM1 (n_1) 在该行驶状态下位于力学工作点。

3) 以最快速度和低功率需求行驶, EM1 (n_1) 在该行驶状态下向相反方向旋转, 驱动型工作状态 (EM2 无功功率流)。

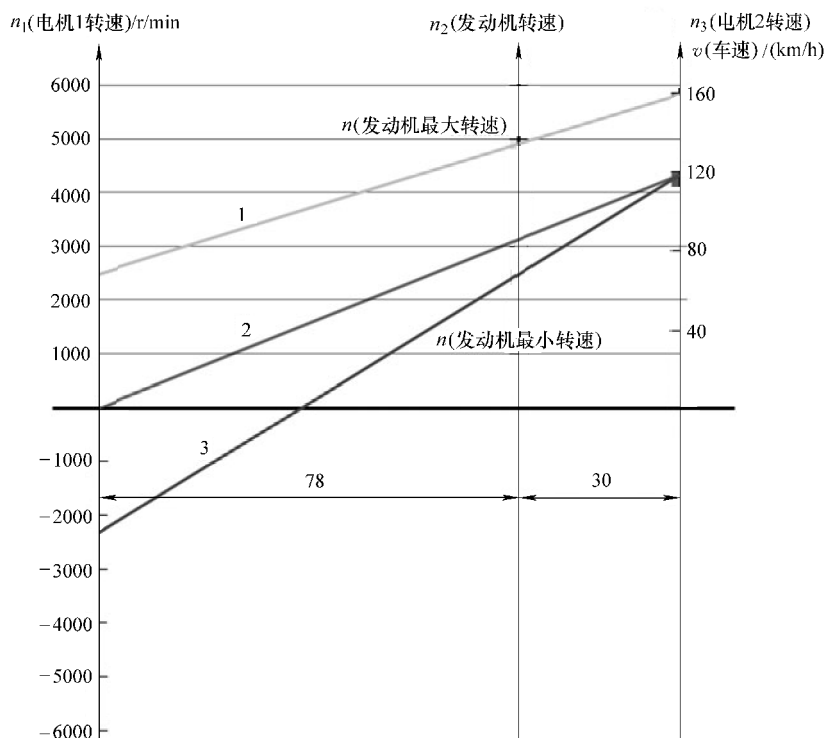


图 6.12 不同行驶状态下发动机转速和车速的关系

应该指出的是, 混合动力汽车根据蓄电池在开始和结束时的充电状态不同, 油耗可能相差很大。图 6.13 为丰田普锐斯第一代在新欧洲行驶循环中不同蓄电池电量状态 SOC 形成的油耗, 图中一台为冷态车辆, 另一台为热态车辆。该结果是将车队中的一辆车在转鼓试验台得出的。假定蓄电池电量状态 SOC 和燃料消耗的趋势线之间的线性关系。从这些直线的倾斜度可以得出结论, 循环开始时, 在冷启动和蓄电池充电状态超过 10% 的情况下, 省油 0.7L/100km。在车辆工作温度下开始的行驶循环, 进一步省油 0.3L/100km, 比上一种情况省油 10%。这表明, 在测试循环开始时, 蓄电池充电状况对油耗有重要影响。此外, 从图 6.13 可知, 当蓄电池电量状态 SOC 平衡时 (循环开始和结束具有相同的电池电量状态 SOC), 即蓄电池电量为 62% 时, 新欧洲行驶循环中的测定的冷启动的丰田普锐斯第一代油耗约 6.0L/100km, 热启动的油耗约 5.3L/100km。

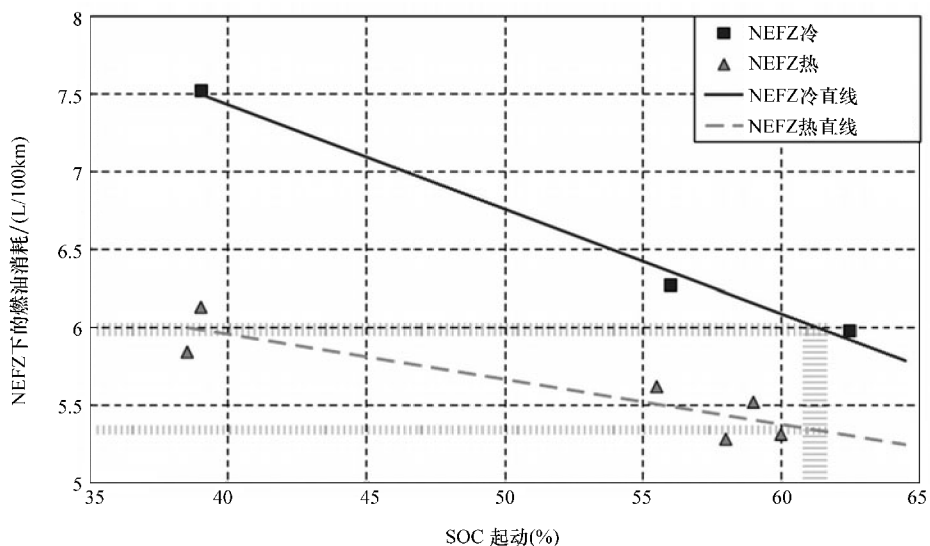


图 6.13 丰田普锐斯第一代在 NEFZ 工况下的燃油消耗

丰田普锐斯第三代

正如在本章开头提到的，目前丰田普锐斯第三代正在市场上进行销售，见图 6.14。该车基于以前的车型，但几乎所有的组件都进行了改进，甚至一些组件有了彻底的改变，其中包括发动机排量增加，电压从 500V 增至 650V，并配备类似丰田雷克萨斯变速比的电机，参见章节 6.2 的图 6.16。总之，这些措施导致混合动力系统的重量降低 17%，体积缩小 13%。与此同时，系统功率在整个速度范围内比上一代提高了 14% ~ 20%。



图 6.14 丰田普锐斯第三代

发动机排量增加到 1.5 ~ 1.8L，同时保持阿特金森循环，以提高在高负荷情况下的效率。为了减少发动机的摩擦功率，装有摇臂凸轮，并降低活塞环的预应力。冷却液泵、空调压缩机和动力转向装置由电动驱动，传动带驱动已经省去，由此进一步降低摩擦。为了减小部分负荷下换气损失，新的 2ZR - FXE 发动机具有废气再循环系统。为了实现废气高循环率，入口通道作为高滚流比进气道保证可燃烧相对稳定。

通过变速比，电动机转速提高到 13 500r/min。为了实现该高转速，电压增加到 650V。这两项措施形成更好的性能和更低的损失（因为电流较低）。在功率电器和电池方面，尤其是冷却已得到改进，从而首先节省了空间和降低了重量。另一项创新是在冷起动后，采用废气热交换器迅速加热冷却剂，通过这些改进，首先可以在冬季提高供暖舒适度。

总而言之，在行驶循环中，这些改进使丰田普锐斯第三代比前一代油耗减少 7% ~ 14%。表 6.2 为丰田普锐斯第三代与第二代在技术参数上的比较。

表 6.2 丰田普锐斯第二代和第三代的技术参数

	第二代	第三代
发动机	1.5L 汽油机、阿特金森循环	1.8L 汽油机、阿特金森循环
额定功率/kW	57	73
额定转矩/N·m	115	142
电机	永磁同步电机、液冷	永磁同步电机、液冷
额定功率/kW	50	60
额定转矩/(N·m)	400	207
最大电流/A	230	170
最高转速/(r/min)	6400	13.500
变速器		
电机转速比	—	2.636
驱动变速比	4.113	3.267
能源存储	镍氢电池	镍氢电池
最大功率/kW	25	27
电压/V	201.6	201.6
油耗		
NEFZ 工况	104g/km	89g/km
美国 FTP 循环	46mpg	50mpg
10.15（日本循环）	35.5km/L	38.0km/L
重量		
空车自重/载重/kg	1375/350	1420/358
总重/kg	1725	1805
行李舱空间/L	410 ~ 1210	445 ~ 1120

6.2 雷克萨斯 RX400h 和 RX450h

如图 6.15 所示,雷克萨斯 RX400h 从 2005 年开始量产上市,已经成为市场上第一款高性能混合动力 SUV。其目的是以一台 4 缸发动机的燃油消耗达到一台 8 缸发动机的性能。目前, RX 型号的混合动力 SUV 已经推出第二代——RX450h。



图 6.15 雷克萨斯 RX400h 和 RX450h

其基本技术类似于丰田普锐斯,有所改变的是在功率分配变速器上增加了一个额外的行星齿轮机构,具有更高的转速,从而提高了电动机功率,如图 6.16 所示,因此转速加倍,相同尺寸的变速器功率由 50kW 增加到 123kW。图 6.17 所示为雷克萨斯 RX400h 变速器横截面,并与普锐斯第二代的特定数据进行比较。

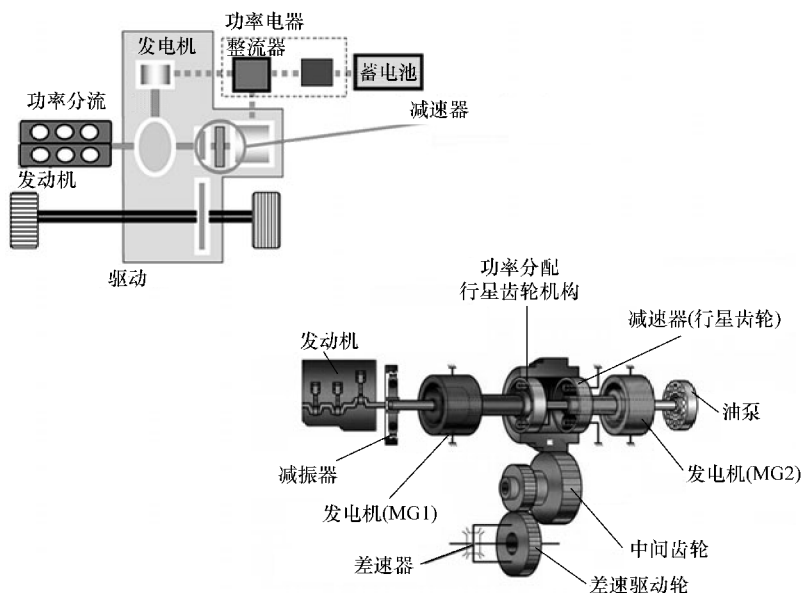


图 6.16 雷克萨斯 RX400h 的前轴驱动图

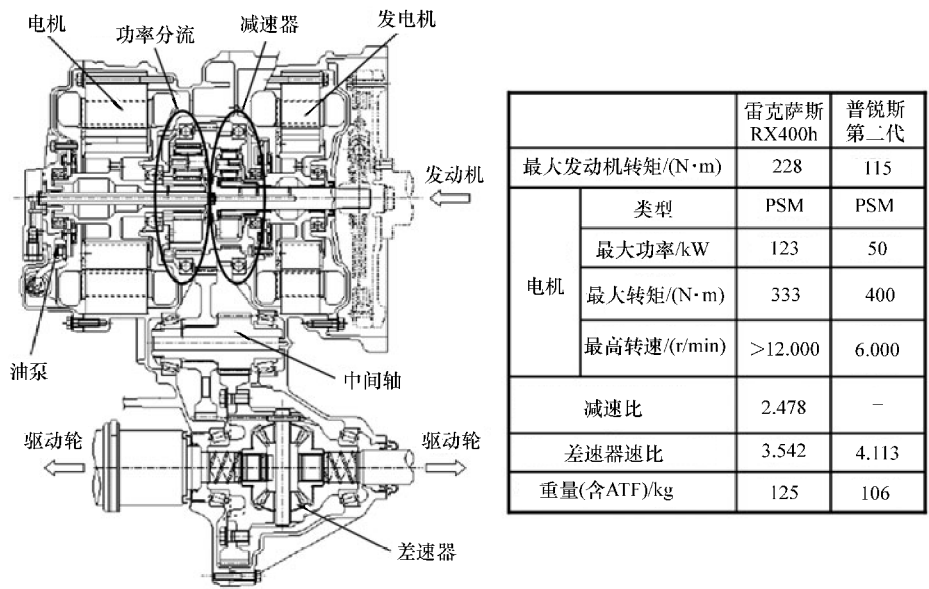


图 6.17 雷克萨斯 RX400h 和普锐斯第二代的变速器对比

此外，后轴上安装了电机，从而实现电动四轮驱动。当车辆迅速加速时，该功能由混合动力控制器自动起动，用于制动能回收，并增强湿滑路面上的牵引力。整个动力总成可以被认为作为两种已知的混合动力结构的组合。一种结构是功率分流结构（动力分配式），被用作前轮混合动力驱动，而另一种结构是增加牵引力的并联式混合动力（TTR 并联结构）作为电驱动的后轴，见图 6.18。

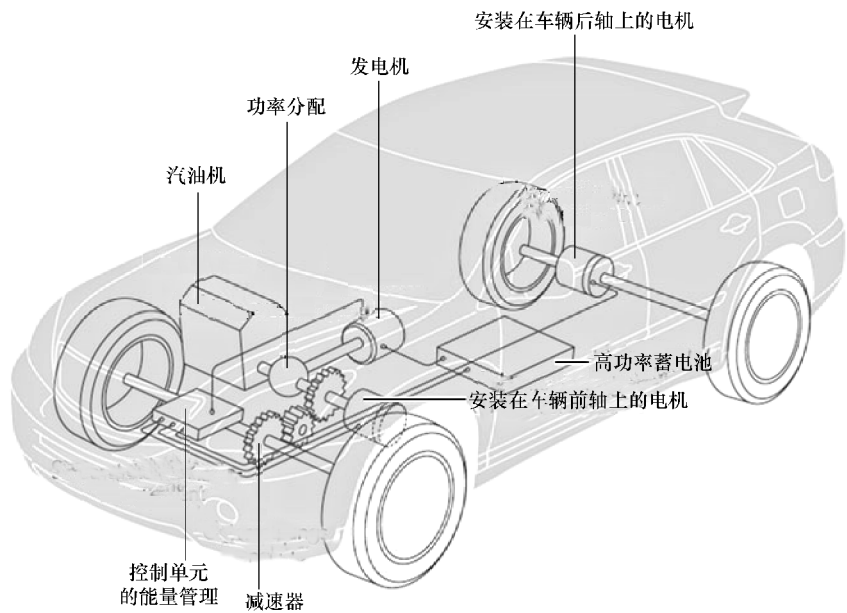


图 6.18 RX400h 的传动链

后轴上的电机是具有 650V 电压的风冷永磁同步电机，其拥有超过 10000r/min 的转速范围。最大功率为 50kW，最大扭矩在转速 0 ~ 650r/min 时为 130N · m。后轮驱动机构的减速齿轮的减速比为 6.859:1。图 6.19 为后轴上电机截面图。

雷克萨斯 RX400h 是一个全混合动力车型，它也可以电力驱动。速度在 60km/h 以内时，电力行驶和负荷点提升的发动机循环交替行驶，参见章节 3.23。类似于普锐斯，雷克萨斯在高速行驶时也存在效率不足的问题，因为大量的功率通过电路传输。

带 240 个电极板的镍氢电池位于车辆后座下方，由三个冷却扇进行冷却，见图 6.20。

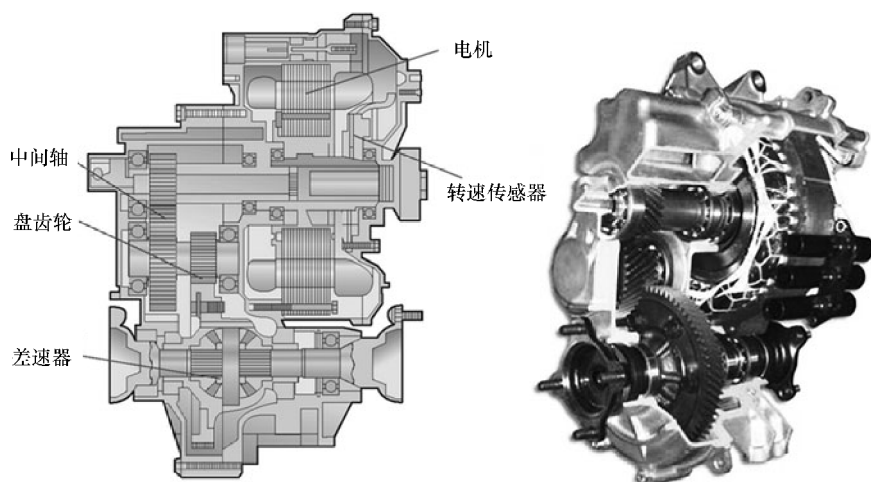


图 6.19 电机以及有变速比的后轴

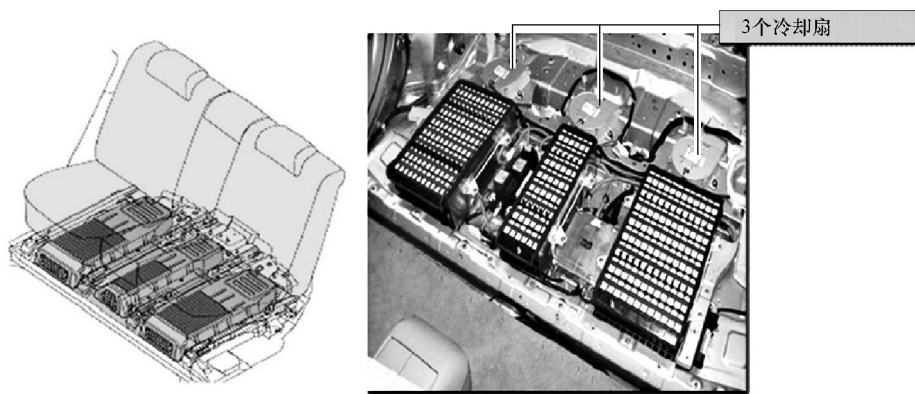


图 6.20 RX400h 的镍氢电池组

雷克萨斯 RX450h

2009 年起，第二代雷克萨斯混合动力 RX 系列上市。新的 RX450h 虽然基本上延续了第一代车型的架构，但对所有组件进行了优化，使新车型功率提高 10%，油耗降低 23%。新车型用排量更大的 2GR - FE - V6 型发动机取代了 3MZ - FE - V6 型发动机。除了提升功率和转矩以外，该发动机还具有阿特金森循环气门控制技术、冷却废气再循环系统，及废气热

交换器，用于冷起动后迅速提高冷却液的温度。无论是阿特金森循环还是冷却废气再循环系统都用于降低废气温度，尤其是高负荷范围内，最大限度减少所需的废气富集，从而保护三元催化转化器并最大限度地降低油耗。在阿特金森循环下，发动机具有更高的压缩比，又因为进气门迟闭，压缩比降低，形成的压缩温度也较低，从而降低爆燃率。通过较高的膨胀比，发动机效率提高，从而降低废气温度。同样，冷却废气的混入也有降低爆燃倾向的效果，由此可以达到提前燃烧，进而实现降低排气温度。混入废气除了使发动机的功能在高负荷状态下得到改进以外，还能实现限流和在低负荷范围内提高发动机效率。

在三元催化转化器后安装废气热交换器可以在环境温度较低的情况下对冷却液进行迅速升温，从而提升发动机温度，在低功率需求下极大改善发动机起动。

虽然对前轴和后轴上的电动机都没有进行改动，但通过改进电力电子的冷却系统可以使两台电动机的最大转矩范围得到提升，蓄电池电压由 280V 升高到 650V。

此外，通过减小摩擦的措施，如改进或加入新的控制功能进一步优化发动机性能。表 6.3 对 RX400h 和 RX450h 的技术参数进行了比较。

表 6.3 雷克萨斯 RX400h 和 RX450h 的技术参数

	雷克萨斯 RX400h	雷克萨斯 RX450h
发动机	3MZ - FE 双顶置凸轮轴 4 气门 V6 汽油机， 智能化可变气门控制	2GR - FXE 双顶置凸轮轴 4 气门 V6 汽油机，智能化 可变气门控制，阿特金森循环
气缸/L	3. 31	3. 456
缸径/行程/mm	92. 0/83. 0	94. 0/83. 0
额定功率/kW	155/5600r/min	183/6000r/min
额定转矩/N·m	288/4400r/min	350/2400 ~ 5000r/min
压缩比/汽油标号	10. 8/ROZ 95	12. 5/ROZ 95
电机	永磁同步电机	永磁同步电机
电机在前轴上的功率/kW	123/4500r/min	174
转矩/N·m	330 从 0 ~ 1500r/min	335
电压/V	650	650
电机在后轴上功率/kW	50，从 4610 ~ 5120r/min	67
转矩/N·m	130 从 0 ~ 610	139
电压/V	650	650
联合驱动		
额定功率/kW	200	220
储能器	镍氢电池	镍氢电池
电压/每组电压	228V；30 组（8 × 1. 2V）	288V；30 组（8 × 1. 2V）
容量/A·h	6. 5	6. 5
最大功率/kW	45	37
车辆性能		
0 ~ 100km/h 加速时间/s	7. 6	7. 8
最高车速/(km/h)	200	200

(续)

	雷克萨斯 RX400h	雷克萨斯 RX450h
传动		
驱动方式	前后 + 后轴电力驱动	前后 + 后轴电力驱动
变速器	连续可变 CVT	连续可变 CVT
驱动轴速比	前 3.080，后 3.944	前 3.137，后 3.944
消耗		
市区油耗/(L/100km)	9.1	6.6
郊外油耗/(L/100km)	7.6	6.0
综合油耗/(L/100km)	8.1	6.3
综合 CO ₂ 排放量/(g/km)	192	148
排放等级	欧 4	欧 4
重量/尺寸		
空车自重/载重/kg	2000 ~ 2040/465 ~ 505	2110 ~ 2205/495 ~ 590
总重/kg	2505	2700
行李舱体积/L	439	496

6.3 雷克萨斯 GS450h

雷克萨斯 GS450h 是高档轿车市场上第一款功率强劲的混合动力汽车，如图 6.21 所示。在汽车上普遍采用的后轮驱动技术也应用于 GS450h 车型上。



3.5L、V6汽油机，功率218kW
新欧洲行驶循环CO₂排放量186g/km
油耗7.9L/100km
0~100km/h 加速时间5.9s
最高车速250km/h

图 6.21 雷克萨斯 GS450h 的驱动技术

这款车基本上基于丰田普锐斯的技术。由于搭载后轮驱动装置，该车具有纵向结构的变速器。这种配置要求电动机位于一定的结构高度，其位置与常规自动变速器的设计高度相当。因此需要一台直径相对较小但功率较高的电机（高转速技术）。跟雷克萨斯 RX400h 相比，除了驱动组件之间无级变化的功率分配以外，首次采用两级减速，如图 6.22 所示。通过相对较大的变速比达到更快的速度，同时实现低速行驶中良好的加速性能。在两级变速器中置入拉维娜式行星齿轮机构，其作用是一方面使变速器结构紧凑，另一方面允许出现大的变速比差。

两个湿运行的液压制动装置可在两个变速级之间进行切换，如图 6.23 所示。在固定制

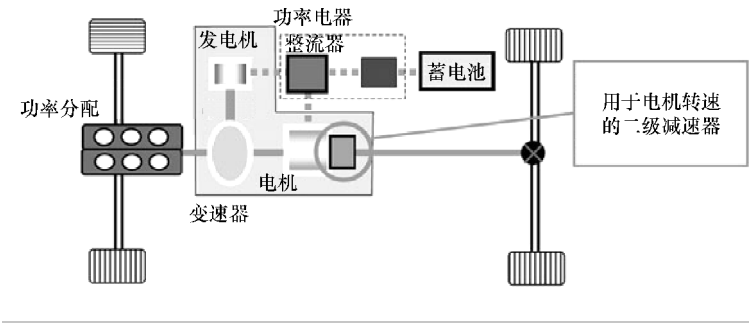


图 6.22 雷克萨斯 GS450h 驱动链

动装置 B1 的情况下，高速范围的变速比为 1.9；在固定制动装置 B2 的情况下，低速范围的变速比为 3.9。

除了功率提升以外，两个变速级的另一个优势在于电机高效工作范围扩大，如图 6.24 所示。图 6.25 为雷克萨斯 GS450h 纵向结构变速器截面图。带二级变速比的变速器位于变速器输出轴。

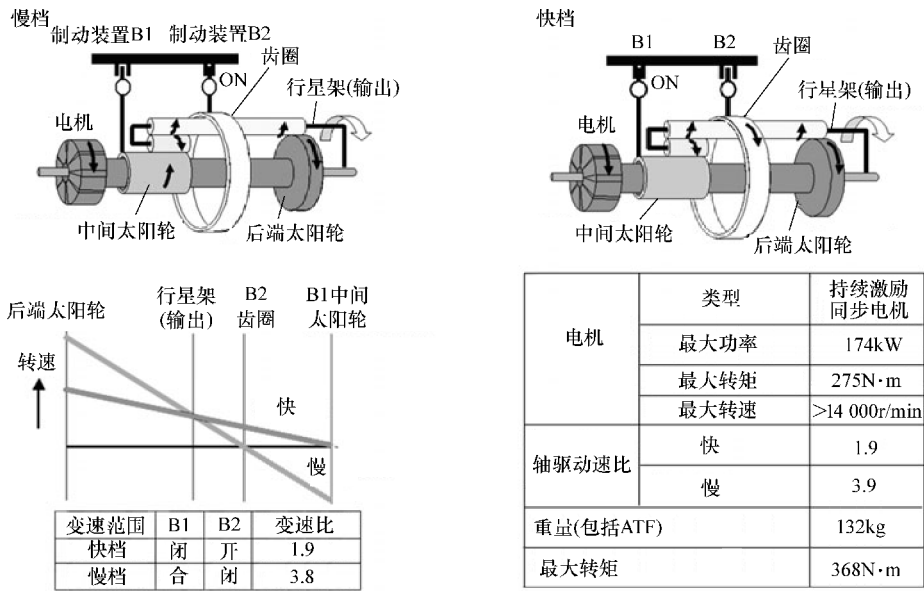


图 6.23 两种驱动状态下的二级速比变速器、转速比和技术参数

GS450h 的 3.5L、V6 汽油发动机（D-4S）具备汽油直喷和吸气管喷射功能。发动机在怠速时只采用汽油直喷操作，而中等负荷时，燃料燃烧稳定，同时为了减少油耗和排放，汽油直喷和吸气管喷射同时使用。在高负荷时，只采用汽油直喷操作，使气缸内油气混合物迅速冷却，从而达到较高的气缸充气。在冷起动时，燃料既可以采用吸气管喷射，又可以直接压缩进入气缸内，使排放性能得到改善，同时使三元催化转化器工作时间提前。通过电机的辅助作用，可以将该混合物压缩得更充分和点火延迟。因此，废气温度可显著增加。同时，

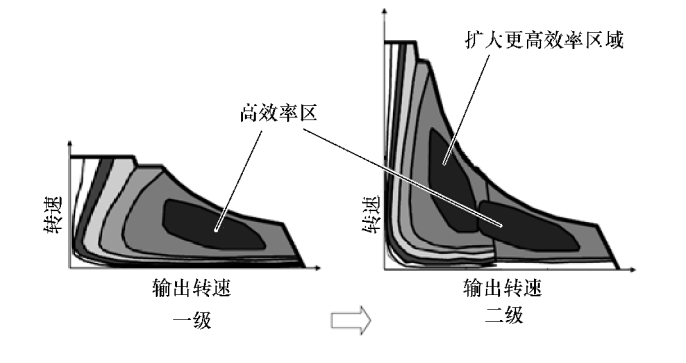


图 6.24 二级变速比对变速器机械部分的影响

功率分配式传动系统可以优化发动机的转速，电机的旋转速度，从而使三元催化转化器快速升温。

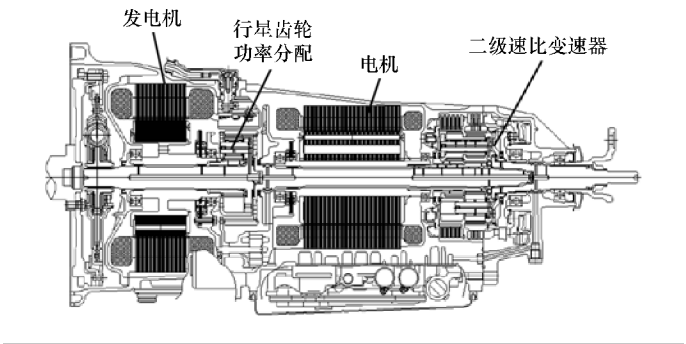


图 6.25 雷克萨斯 GS450h 变速器纵向结构图

为了达到良好的油耗值，车辆匀速行驶时，发动机通过 E - CVT 变速器选择极低的转速。例如，车辆以速度 100km/h 行驶时，发动机转速为 1400r/min，该转速比 8 缸发动机和 6 速自动变速器的车型低约 400r/min。即使发动机转速不高，雷克萨斯 GS450h 在加速时也有良好的表现，因为通过发电机可以迅速提高发动机转速，并且通过电池和电动机进行支持。

表 6.4 所列为 GS300 与 GS450h 的技术参数。混合动力技术大幅度提高了车辆性能且使油耗明显降低。

表 6.4 雷克萨斯 GS300 和 GS450h 技术参数对比

	雷克萨斯 GS300	雷克萨斯 GS450h
	4 气门 V6 汽油发动机双 VVT - i	4 气门 V6 汽油发动机双 VVT - i
气缸容积/L	2.995	3.456
额定功率/kW	183 当 6200r/min 时	218 当 6400r/min 时
额定转矩/N · m	310 当 3500r/min 时	368 当 4800r/min 时
压缩比	11.5∶1	11.8∶1
电机		永磁同步电机

(续)

	雷克萨斯 GS300	雷克萨斯 GS450h
	4 气门 V6 汽油发动机双 VVT - i	4 气门 V6 汽油发动机双 VVT - i
额定功率/kW		147kW
额定转矩/N · m		275N · m
混合驱动 (Hybrid)		
额定功率/kW		
能量存储		镍氢混合动力电池
电压		288V; 40 组 (6 × 1.2V)
容量/A · h		6.5A · h
车辆性能		
0 ~ 100km/h 加速时间/s	7.2	5.9
最高车速/(km/h)	240	250 (电子限速)
传动系统		
驱动方式	后轮	后轮
变速器	6 档自动变速器带连续切换模式	混合驱动, E - CVT 变速器 (两级减速)
自动变速比	3.538/2.060/1.404/1.000/ 0.713/0.582/R3.168	
轴速比	3.727	
消耗		
燃料消耗 (市区)/(L/100km)	14.0	9.1
燃料消耗 (郊区)/(L/100km)	7.0	7.0
燃料消耗 (综合)/(L/100km)	9.5	7.6
CO ₂ 排放量 (综合)/(g/km)	224	180
排放等级	欧 4	欧 4
重量/尺寸		
空车自重/载重/kg	1660/465	1930/425
总重/kg	2125	2355
行李舱体积/L	430	330

6.4 雷克萨斯 LS600h

雷克萨斯 LS600h 是采用混合动力技术的功能强大的高档轿车，见图 6.26。该款混合动力车型的目标是，用 V8 发动机达到配备 12 缸发动机汽车的性能。

该混合动力总成类似于 GS450h 的配置，但 LS600h 配备了机械式全轮驱动系统与托森差速器，如图 6.27 所示。

图 6.28 为变速器结构。机械油泵由发动机驱动。在发动机停止时，电动油泵为系统提供油压。用于操作变速级的两个制动装置的液压控制系统安装在传动装置下方。发电机和电动机除了用于功率传输以外的另一个功能是在传动链中作为缓冲装置。由此，发电机和电动机分别减轻发动机和传动链的振动。这意味着传递到车内的振动也较少，舒适性有显著改善。



5.0L、V8汽油发动机，功率290kW
新欧洲行驶循环CO₂排放量219g/km
油耗9.3L/100km
0~100km/h 加速时间6.3s
最高车速250km/h

图 6.26 雷克萨斯 LS600h

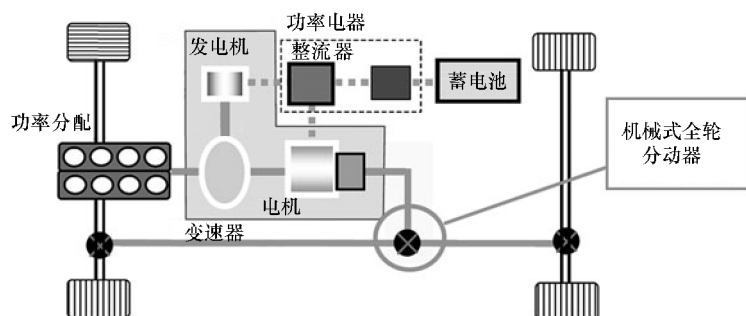


图 6.27 雷克萨斯 LS600h 的驱动技术

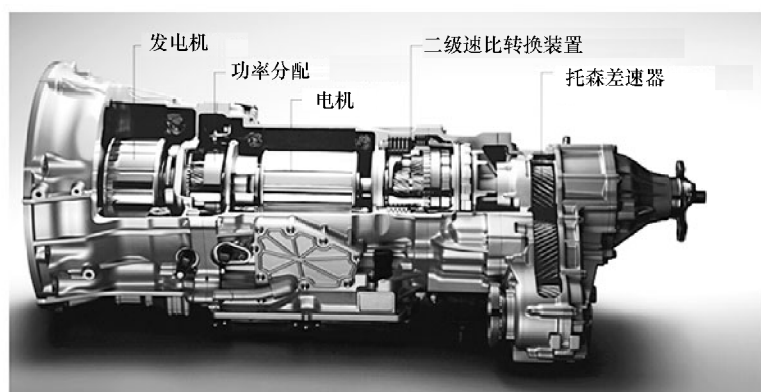
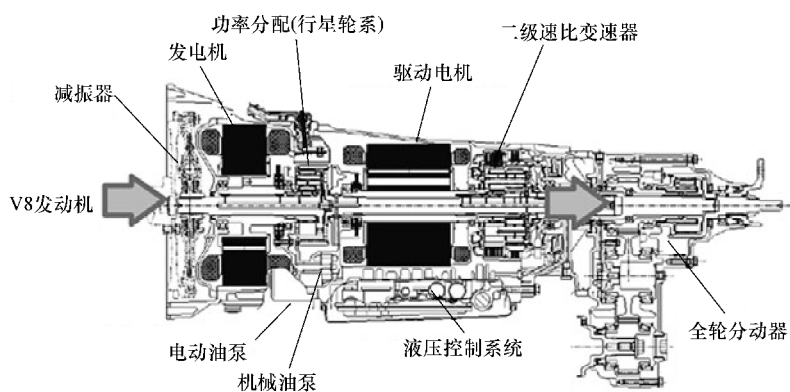


图 6.28 雷克萨斯 LS600h 变速器的剖面图及照片

类似 GS450h, LS600h 配备的 5.0L、V8 汽油机同样具有吸气管喷射和汽油直喷功能。这款汽油机的一大特色是可电动调整凸轮轴相位器。与 GS450h 采用的液压调节相比,该电动相位器可以实现明显更快的调节速度。图 6.29 显示电动相位器以 40km/h 初速度加速下的气门开闭性能,与 GS450h 采用的液压调节相比提前了 0.5s,因此,此时转矩和加速度也相对更佳。

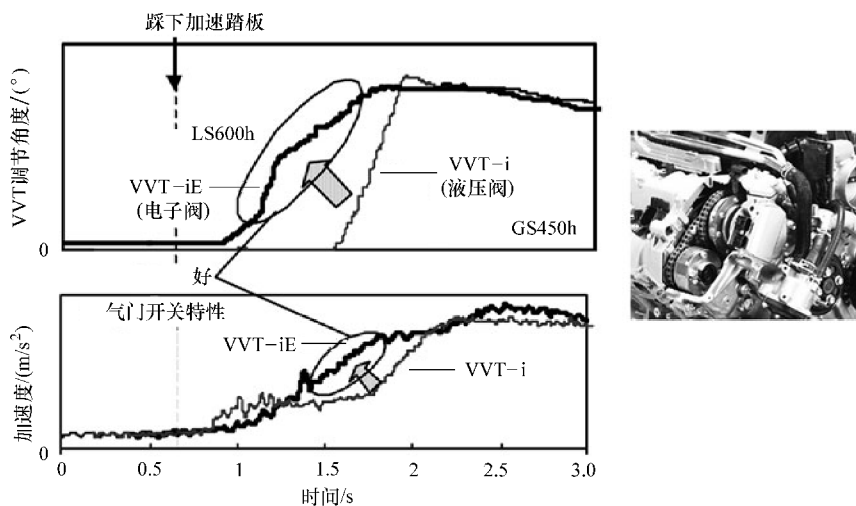


图 6.29 在加速过程中带有相位调节的气门开关特性

拥有 288V 额定电压的镍氢电池由 20 个串联在一起的电池模组组成,每个模组的电压为 14.4V。该电池位于后座后面,由空调系统产生的冷风进行冷却,如图 6.30 所示。

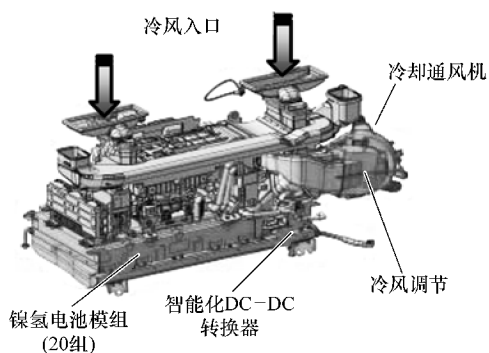


图 6.30 雷克萨斯 LS600h 的电池

类似于普锐斯,驾驶人也可以开启 LS600h 的电动行驶模式,在一定的电池电量下,当供暖和制冷需求低时,在低速和低速加速范围内可实现纯电动行驶。FTP 行驶循环中根据车速和加速踏板位置的不同,电动行驶的工作范围如图 6.31 所示。表 6.5 对 LS460 和 LS600h 的技术参数进行了比较。

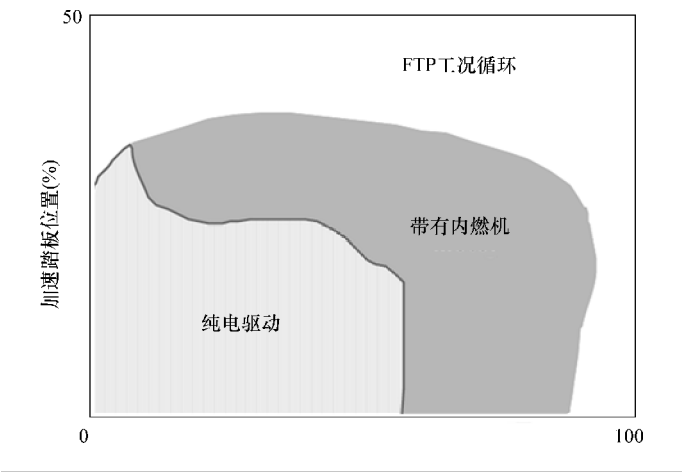


图 6.31 FTP 行驶循环中电动行驶的工作范围

表 6.5 比较 LS460 和 LS600h 的技术参数

	雷克萨斯 LS460	雷克萨斯 LS600h
发动机	4 气门 V8 直喷汽油机具有双 VVT-i	4 气门 V8 直喷汽油机具有双 VVT-i
气缸容积/L	4.608	4.969
额定功率/kW	280 当 6400r/min	290 当 6400r/min
额定转矩/N·m	493 当 4100r/min	520 当 4000r/min
压缩比	11.8:1	11.8:1
电机		永磁同步电机
电机功率/kW		165
额定转矩/N·m		300
混合驱动		
额定功率/kW		327
能量存储		镍氢电池
电压		288V; 20 组 (12×1.2V)
车辆性能		
0~100km/h 加速时间/s	5.7	6.3
最高车速/(km/h)	250 (电子限速)	250 (电子限速)
传动系统		
驱动方式	后轮驱动	全轮驱动
变速器	8 档自动变速器带连续切换模式	混合驱动 E-CVT 变速和具有两级减速
自动变速比	4.596/2.724/1.863/1.464/1.231/ 1.000/0.824/0.685/R2.176	
轴速比	2.937	
消耗		
燃料消耗 (市区)/(L/100km)	16.5	11.3
燃料消耗 (郊区)/(L/100km)	7.9	8.0

(续)

	雷克萨斯 LS460	雷克萨斯 LS600h
发动机	4 气门 V8 直喷汽油机具有双 VVT - i	4 气门 V8 直喷汽油机具有双 VVT - i
燃料消耗 (综合)	11.1	9.3
CO ₂ 排放 (综合)/(g/km)	261	219
排放等级	欧 4	欧 4
重量/尺寸		
空车自重/载重/kg	2055/440	2355/375
总重/kg	2495	2730
行李舱体积/L	565	390

6.5 本田整体式电机辅助（IMA）混合动力系统

1999 年，本田首次将 IMA 混合动力系统应用于 Insight 量产车系。2003 年，本田推出搭载第二代 IMA 混合动力系统的思域（Civic），2005 年推出雅阁 V6 混合动力版。新技术方面，本田近年推出改进版思域 IMA 混合动力车 2006 款以及第三代本田 Insight，如图 6.32 所示。



图 6.32 本田 IMA 系统的车型历史

图 6.33 为新本田 Insight 的 IMA 混合动力系统的结构图。IMA 动力总成的所有型号均为横向结构。电机位于发动机和 CVT 变速器之间。电池和功率电器位于车辆后排后的行李舱下面（Insight 2010），并通过铝制管道内的高压线与电动机连接。

IMA 系统属于并联式混合动力系统，其特点在于曲轴起动（发电）机与思域混合动力车型的 158.4V 高性能电池以及新 Insight 的 101V 高性能电池。IMA 系统的核心部分为发动机和离合器之间的电动机/发电机，然后是 CVT 变速器。图 6.34 所示为该动力装置的电动机和 CVT 变速器。

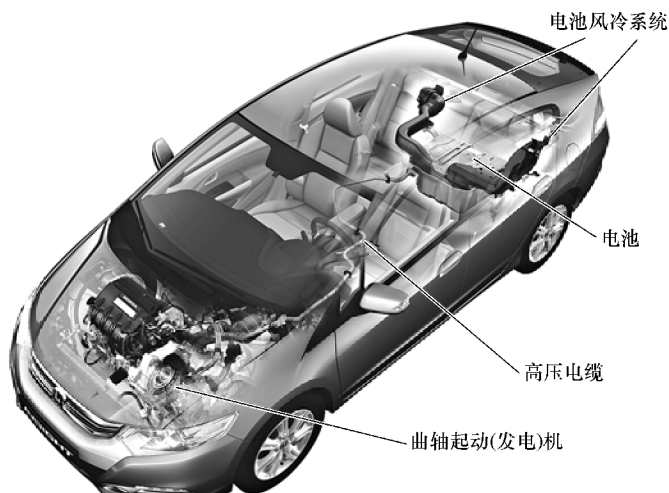


图 6.33 新款本田 Insight 2010 混合动力技术

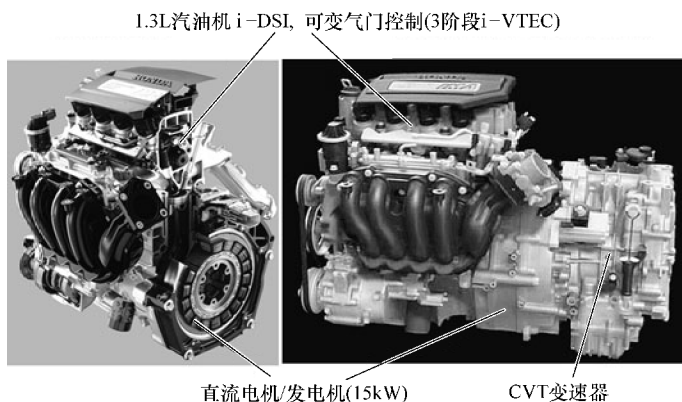


图 6.34 本田 IMA - 驱动系统的驱动单元

为了充分利用 IMA 混合动力系统的优点，如制动能回收和电力驱动，以 1.3L、SOHC i-DSI 发动机为基础，思域 2006 混合动力款研发出带 3 阶段 i-VTEC（可变气门正时和升程电子控制）系统的发动机。该 2 气门 DOHC 发动机在进气侧有 3 个摇臂和 2 个凸轮摆块，出气侧有 2 个摇臂和 1 个凸轮。该机械系统允许进气侧两个不同的凸轮摆块进行切换，关闭进气门和排气门，如图 6.35 所示。通过 3 个可移动的传动销进行激活，三个传动销由三个独立的液压通路中的油压进行控制，滚子摇臂转动与气门摇臂的结合/开放激活进排气门，如图 6.36 所示。

如图 6.37 所示，切换可能性由相应的气门升程实现。在部分负荷且转速保持在中低速时，外凸轮控制外侧滚子摇臂，该滚子摇臂通过锁定切换销带动控制气门摇臂，见图 6.37a。中间的滚子摇臂与中间的凸面摆块共振，弹簧区为“空”。转速高时，中间滚子摇臂进一步通过液压控制传动销与摇杆及进气门控制连接，如图 6.37b。目前进气门由中间更陡、进气更充分的凸轮控制。此外，外部滚子摇臂在气门升程过程中升起。因此，满负荷时

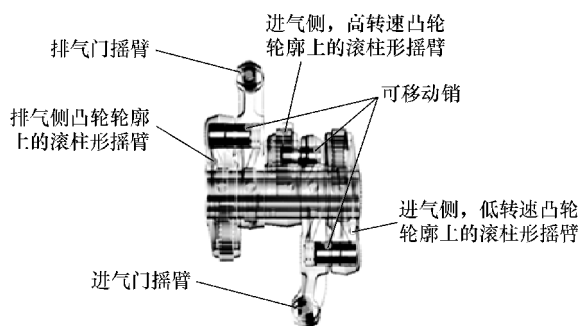


图 6.35 3 阶段 i-VTEC 系统（可变气门正时和升程、电子控制）

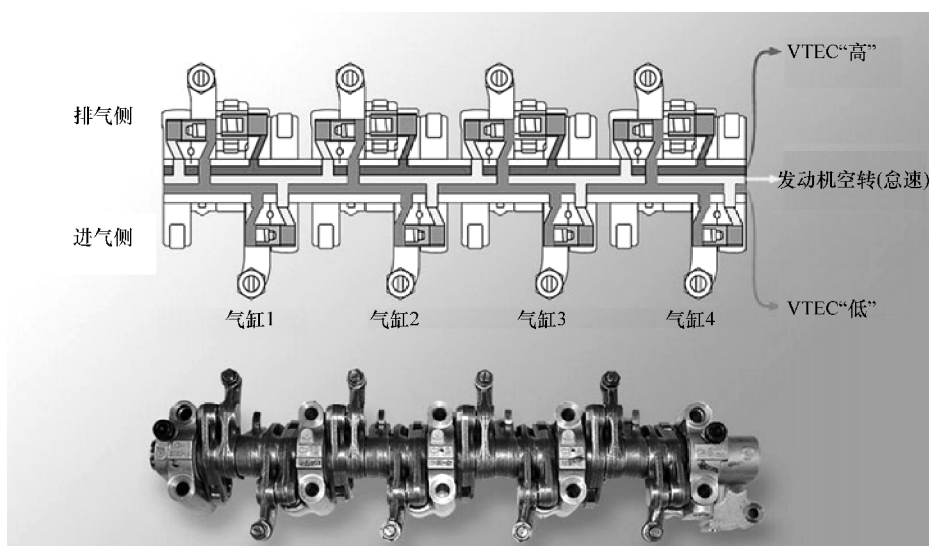


图 6.36 可移动传动销的液压控制路径和 3 阶段 i-VTEC 系统的曲轴总成

的性能和发动机转动平衡性得到显著改善。

关闭气门，使气缸关闭，外侧的传动销向内移动，中部的传动销移向右边，从而使所有摇臂之间的连接断开，见图 6.37c。气缸关闭使车辆惯性滑行中和电动行驶中发动机牵引功率显著降低，如图 6.38 所示。由于发动机与电机不能断开，所以在电动行驶时，发动机处于从动状态。

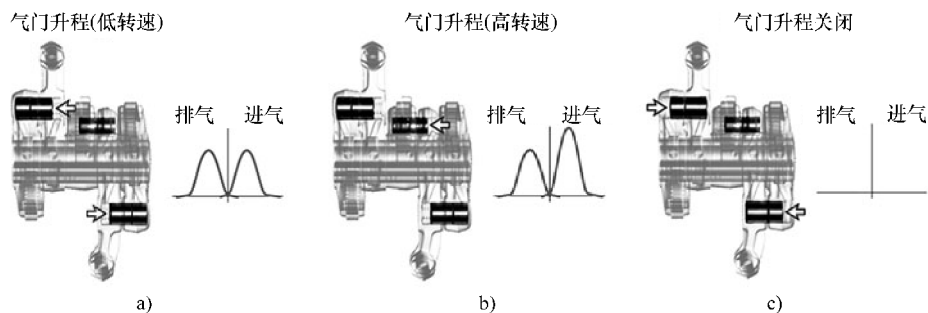


图 6.37 本田 i-VTEC 切换可能性和相应的气门升程

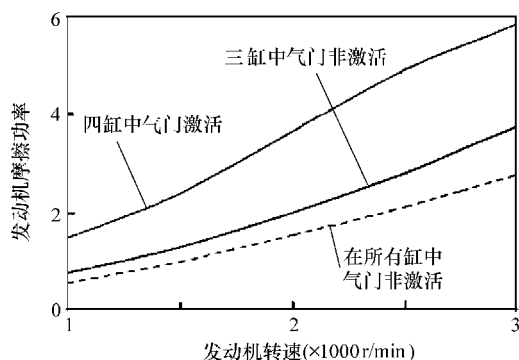


图 6.38 本田 i-VTEC 发动机在气门激活和非激活下的转速引起的发动机摩擦功率

跟思域混合动力汽车 2006 款相比，Insight 2010 配备 2 阶段 VTEC 系统，也就是说，Insight 2010 只能在一种行驶模式和气门关闭之间进行选择。思域混合动力 2006 款和 Insight 2010 都具有双火花塞顺序点火系统，如图 6.39 左。此外，Insight 车型还具有带集成化排气歧管的整体气缸盖，如图 6.39 右。

本田 IMA 系统驱动器的另一个特点是 CVT 变速器，见图 6.40。通过自由选择变速比，发动机可以从很宽的转速范围进入较窄且省油的转速范围。

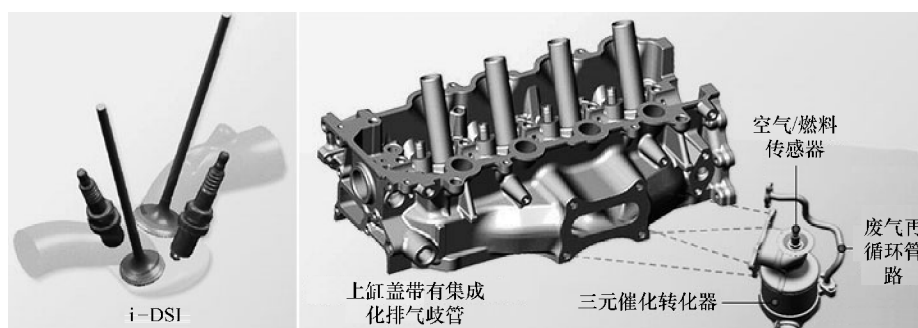


图 6.39 Insight 2010 车型中的双火花塞顺序点火系统 (i-DSI) 和上缸盖带有集成化排气歧管

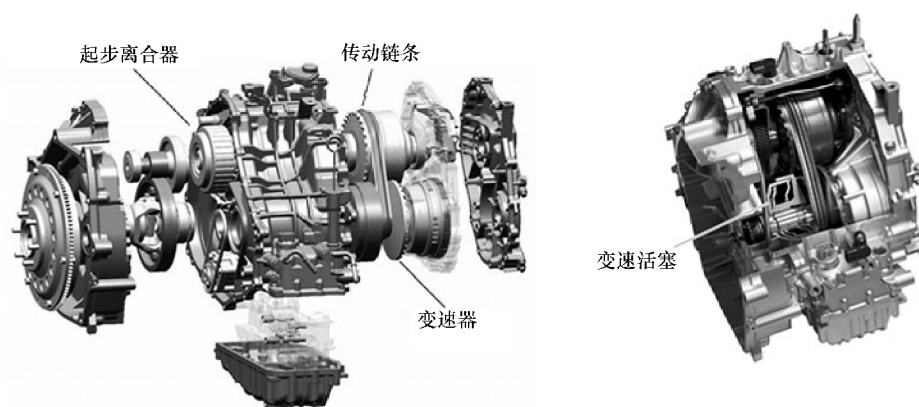


图 6.40 CVT 变速器和本田 IMA 传动链

IMA 系统自 2006 年以来采用磁铁内嵌的永磁同步电机——IPM 电机（内嵌式永磁同步电机）。因此，采用高磁通密度的稀土磁铁（Nd-Fe-B）实现高磁感应。这使弱磁电流在高转速情况下降低，从而较以前使用的常规发动机 PSM 式电机降低了铜损失。另一个变化是定子上的铜线横截面为四边形而不是如今使用的圆形截面。这一方面可以使导电横截面增大，电阻降低，同时能使绕组更充分地利用定子的槽形横截面。上述措施使电动机的最大转矩从 2003 款的 $49\text{N}\cdot\text{m}$ 增加到 2006 款的 $103\text{N}\cdot\text{m}$ ，发电机转矩增加到 $123\text{N}\cdot\text{m}$ ，见图 6.41。同时，使相电流和损失可以显著降低。通过优化发动机和电机，动力系统的性能较以前的车型大大提高，图 6.42 中显示了满载时的转矩和功率运行曲线。

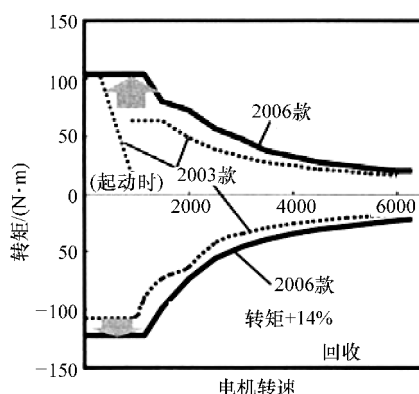


图 6.41 电机的转矩比较（2003 款和 2006 款车型）

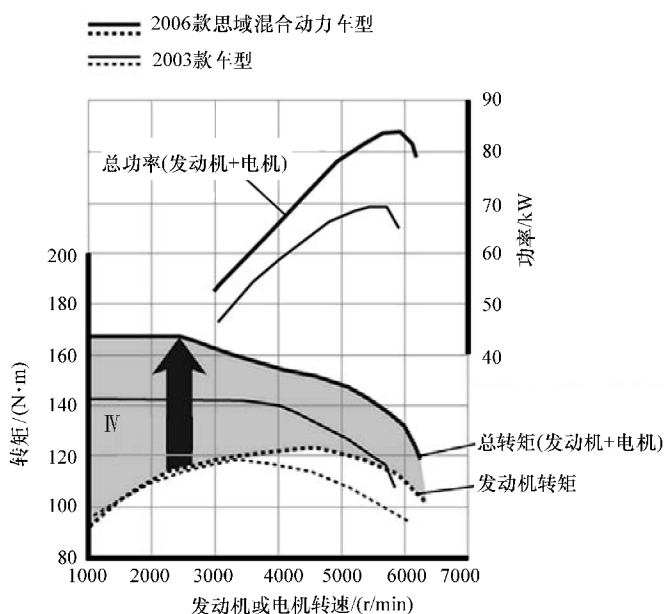


图 6.42 总转矩和总功率 - 比较 2003 款和 2006 款车型

Insight 2010 的电池电压降低至 101V ，电流增强了，因此导致电机产生更多热量，可通过增加感应率以及将磁体分为两个部分使产生的热量保持恒定。此外，转子和定子的磁轭长度变短，使电机的质量减轻 15% 。虽然跟思域 2006 款相比，Insight 2010 的性能有所降低，但如表 6.6 所列，发动机的省油能力保持不变。

表 6.6 比较在思域 Hybrid 2006 和 Insight 2010 车型上的电机参数

		思域 Hybrid 2006	Insight 2010
电池电压/V		158	101
最大转矩/N·m	发动机起动	103	100
	提速	103	78
	回收	123	85
最大功率/kW	提速	15	10
	回收	15.5	13.5

集成在 IPU（智能动力单元）中的电机整流器位于后座后方，并与三相高压电缆相连，如图 6.43 所示。IMA 驱动电机的转换器是与混合动力制冷压缩机的转换器，即 12V 的 DC/DC 转换器，以及 PCU（动力控制单元）中的电池控制装置结合在一起的。IPU 的部件除 PCU 之外还有镍氢高压动力电池和风冷系统。IPU 所有部件都采用风冷技术，集成在内的鼓风机为此提供所需的冷空气流量。

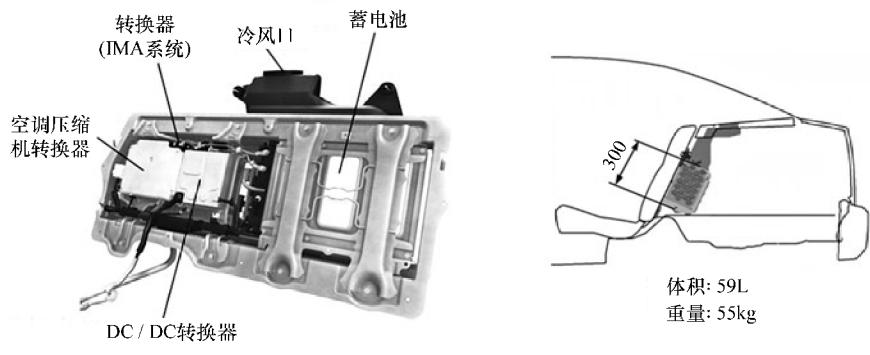


图 6.43 本田思域混合动力 2006 年车型的 IPU（智能动力单元）

电池的电极板为圆柱形。本田思域混合动力将电极板的排列从栅格状改良为交错堆叠的层叠状排列。尽管电极板数量从 120 个增加至 132 个，但电池体积比 2003 款却减小了 12%。另外，可省去在电极板之间的隔板。表 6.7 列出了镍氢高压动力电池的重要参数。

表 6.7 镍氢高压动力电池（本田思域混合动力）2003 款和 2006 款车型

		本田思域混合动力 2003 款	本田思域混合动力 2006 款
电容量/A·h		6.0	5.5
电池电压（每组）/V		1.2	1.2
内阻/mΩ		3.27	2.1
电极板重量/kg		0.164	0.166
电极板个数		120	132
电池组总电压/V		144	158.4
电动机功率/kW		11.5	16.1
发电机功率/kW		10.6	13.3
电解液密度/(mmol/电解槽)	KOH	5	8
	NaO	3	9
	LiO	1	6

本田 Insight 2010 款将 IPU 的体积减小 19% 降至 48L，重量下降 38kg，降低 28%。其瘦身一方面是因为各个部件不断被优化，另一方面是因为整流器、DC/DC 转换器及电池控制装置集成为一体。

本田思域混合动力 2006 款搭载的新 IMA 混合动力系统具有 8 个行驶模式，可以通过智能策略进行选择，如图 6.44 所示。优化还包括 3 阶段 i-VTEC 气门控制系统。车辆静止时，发动机和电动机都关闭。起步时需要大的加速度，两台机器同时工作。仅需要较小的加速度时，由发动机进行驱动。低速匀速行驶则只由电动机进行驱动（低速巡航）。由于发动机和电机不能去耦，通过禁用气门来控制减小气缸摩擦（气缸空转）。在加速时，发动机起动。在高转速范围内，只要有高负荷需求，气门控制模式切换至更陡、更充分的气门升程模式。在高转速范围内，但负荷需求低时，气门控制模式切换至低升程进气凸轮模式。在发动机牵引运行中（减速）对蓄电池进行充电，该过程中发电机的制动功能切换为能量再生功能。为了提高能量再生的能力，气门被禁用（气缸空转）。

在制动过程中，会尝试最大限度回收动能。因此，制动压力传感器获取驾驶人的减速意愿，并将其分为电机再生制动和摩擦系统的液压制动两个部分，如图 6.45 所示。在电池充电状况允许的情况下，为了最大限度地储存电能，适度踩下制动踏板时，首先通过发电机进行再生式制动。只有在紧急制动时，才需要常规液压制动装置的辅助。

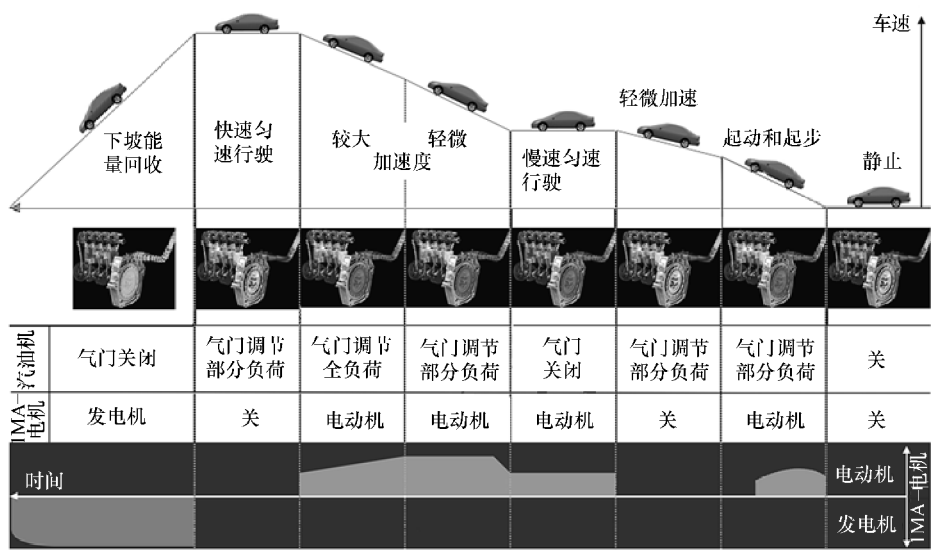


图 6.44 本田思域混合动力 2006 款运行策略（根据功率需求）

表 6.8 所列为本田思域混合动力 2006 款和 Insight 2010 款部分技术参数，并与本田思域常规款进行比较。

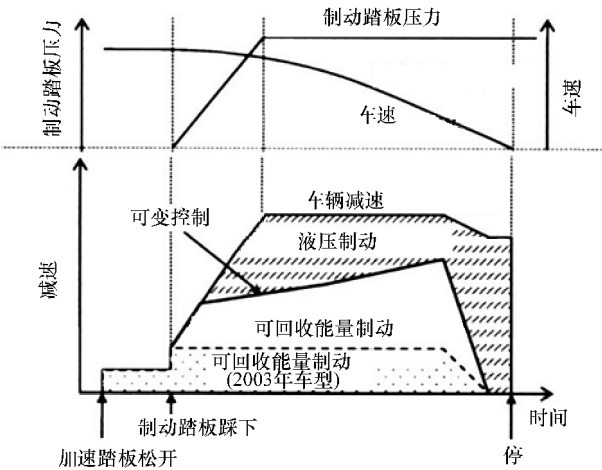


图 6.45 利用部分可回收能量制动

表 6.8 思域 1.4i VTEC、思域 IMA Hybrid 1.3 和 Insight Hybrid 的技术参数比较

	思域 1.4i VTEC Basis	思域 Hybrid 1.3 2006 款	Insight Hybrid 1.3 2010 款
发动机	四气门四缸汽油机 (SOHC) VTEC - 气门控制	双火花塞顺序点火系统 (i-DSI) 2 气门直列四缸 汽油机 (SOHC) 3 阶段 i-VTEC 系统	双火花塞顺序点火系统 (i-DSI) 2 气门直列四缸 汽油机 (SOHC) 2 阶段 i-VTEC 系统
气缸排量/L	1.339	1.339	1.339
缸径×行程/mm	73×80	73×80	73×80
额定功率 kW/(r/min)	73/6000	70/6000	65/5800
额定转矩 (N·m)/(r/min)	127/4800	123/4600	121/4500
压缩比	10.5:1	10.8:1	10.8:1
电动机/发电机		IPM (内部永磁)	IPM (内部永磁)
额定功率 (在 r/min)/kW		15/2000	10/1500
额定转矩 (电机)/N·m		103/0~1160 (转)	92/0~500 (转)
额定转矩 (发电机)/N·m		123/0~1160 (转)	
综合驱动			
额定转矩/N·m		167	167
功率/kW		81	72
能量存储		镍氢混合动力电池	镍氢混合动力电池
电压/每极电压		158.4V (132 组/ 1.2V) 11 模块	100.8V (84 组/ 1.2V) 7 模块
电容量/A·h		5.5	5.75
最大功率/kW		16.1	12.4
重量/kg		30.73	20.14

(续)

	思域 1.4i VTEC Basis	思域 Hybrid 1.3 2006 款	Insight Hybrid 1.3 2010 款
车辆性能			
0 ~ 100km/h 加速时间/s	13.0	12.1	12.4
最高车速/(km/h)	177	185	182
传动系			
驱动	前轮驱动	前轮驱动	前轮驱动
变速器	手动档	CVT 自动档	CVT 自动档
变速比	3.416/1.869/1.235/0.948/ 0.809/0.727/R3.307	2.526 - 0.421 R 4.510 - 1.875	3.172 - 0.528 R 5.664 - 2.125
轴减速比	4.750	3.937	4.200
燃油消耗			
市区/(L/100km)	7.3	5.2	4.6
郊外/(L/100km)	5.0	4.3	4.2
综合/(L/100km)	5.9	4.6	4.4
CO ₂ 综合排放量/(g/km)	135	109	101
排放等级	欧 5	欧 4	欧 5
重量			
空车自重/载重/kg	1257/433	1368/352	1276/374
总重/kg	1690	1720	1650
行李舱容积 (VDA) (l)	456	350	339/408

6.6 奔驰 S400 混合动力

奔驰在豪华型轿车级别推出 S 级中度混合动力车型 S400 HYBRID，如图 6.46 所示。

奔驰 S400 HYBRID 电机位于 3.5L、6 缸汽油机和 7 速自动变速器的输入端之间。电机最大功率 15kW。此外，还配备一台外转子永磁同步电机，额定转矩为 160N·m。该永磁同步电机安装在曲轴上并具有 32mm 的有效长度，如图 6.47 所示。因此，该系统为并联式混合动力技术应用于曲轴起动（发电）机结构。根据配备的电功率，该车型被划分为中度混合动力。

锂离子电池作为蓄电池首次批量化装配在汽车上。该款锂电池有 35 块电极板，额定电压为 126V，电容量 0.8kW·h，如图 6.48 所示。此外，动力总成通过常规 12V 铅酸蓄电池为 12V 车载电网供电。两块电池可以通过一个 DC/DC 转换器进行双向能量交换。

由于电动机厚度仅有 45mm，可以集成在动力总成上，且无需对汽车进行太大结构上的改变。图 6.49 为奔驰 S400 HYBRID 混合动力系统的传动链，功率电器直接安装在电机上，并通过导电轨连接。锂电池位于常规 12V 起动电池的位置。该结构缩短了高压电网中线路的长度。为了确保舒适性和安全功能，即使在发动机关闭时，由锂电池对空调压缩机、转向助力泵和制动真空泵进行电力支持。由于省去了传动带的摩擦损失和根据需求对辅助单元进

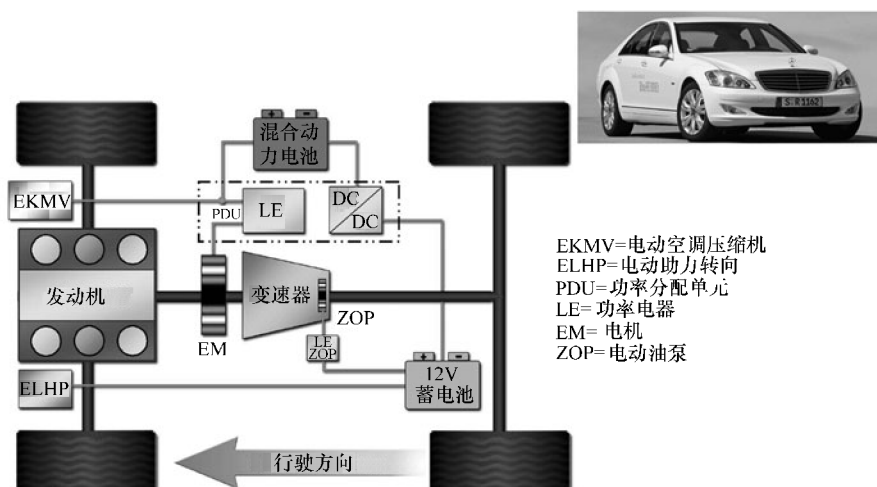


图 6.46 奔驰 S400 混合动力汽车的混合动力系统

外转子结构

最大机械功率: 约 15kW (105V, 1500 r/min)

最大发电功率: 约 19kW (130V, 2000 r/min)

没有附加冷却

最大起动转矩: 210N·m (-25°C)

额定转矩: 160N·m (900 r/min)

输入电压: 直流 120V

直径: 325mm

传动链延长: 45mm

磁铁材料: Nd-Fe-B

重量: 约 20kg

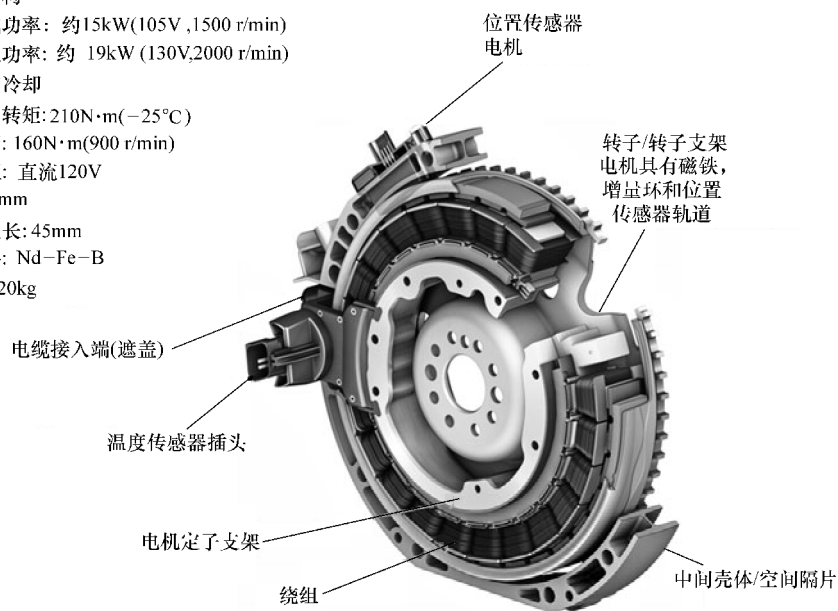


图 6.47 奔驰 S400 混合动力汽车的电动机

行控制，该措施也有助于降低油耗。

奔驰 S400 HYBRID 的电池冷却系统与众不同。电极板的温度对锂电池的使用寿命影响非常大，因此高压动力电池通过空调系统的冷却液进行冷却。在发动机停止工作的情况下，电动空调压缩机不仅要保证车内空调正常工作，还要保证该情况下电池不超过极限温度，且使电池的温度保持在 10 ~ 40°C 的最佳范围内。图 6.50 所示为电池冷却系统的线路图和整体结构。

蓄电池: 35块极板(组)
 电压: 126V, 最高 144V, 最低 87.5V
 功率: 19kW/10s
 能量容量: 0.8kW·h
 电容量: 6.5A·h
 冷却: 集成在汽车空调系统内
 保存期: 10年

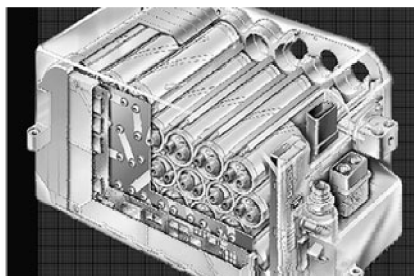


图 6.48 (奔驰 S400 混合动力汽车) 的锂离子电池系统

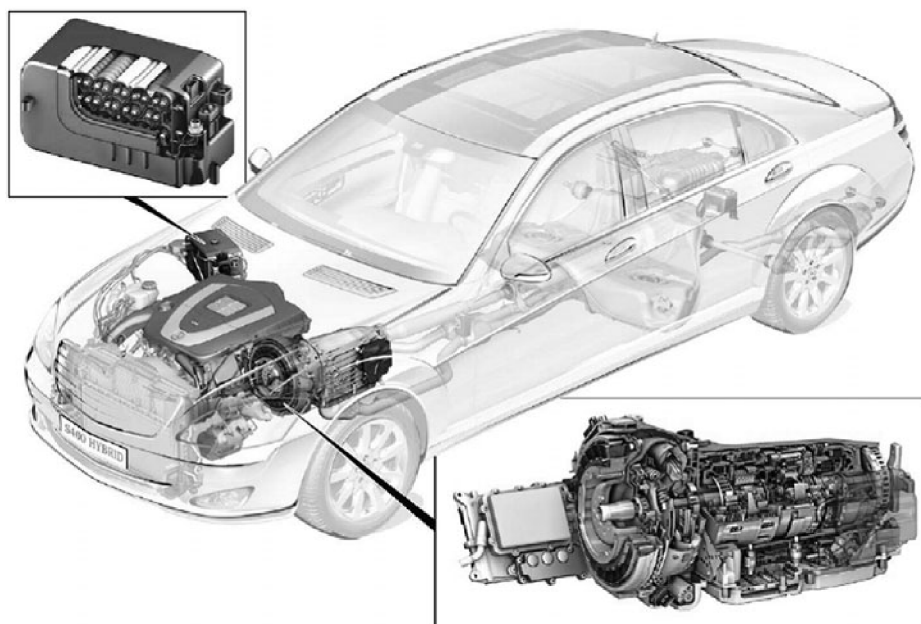


图 6.49 奔驰 S400 混合动力汽车上的传动系统

除了温度, 充放电深度对蓄电池使用寿命的影响也相当大。通过适当的运行策略可以实现蓄电池 SOC 差(起始等级到目标等级)保持在 $\pm 5\%$ 范围内。当该比例达到 10% 时即一个相当低的水平, 蓄电池 SOC 循环充放电深度达到 10% 非常少见, 如图 6.51 所示。因此, 电能的再生是一个折中的办法, 该措施一方面为了尽可能多地储存电能, 另一方面由于保存性的原因需要较低的蓄电池 SOC 行程。

混合动力技术允许以下 3 种可通过运行策略激活的纯发动机驱动行驶模式: 起/停功能、能量再生、提速/负荷点位移。

起/停功能

在章节 3.2.2 中已经介绍过, 起/停功能允许发动机在车辆静止时停止, 下一次启动时自动发动。发动机在由于电动助力转向造成的减速, 不涉及行车安全下且行驶速度在约

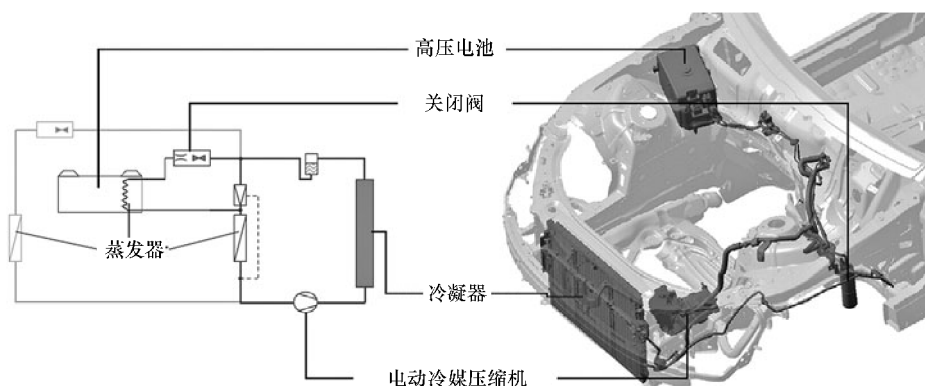


图 6.50 奔驰 S400 混合动力汽车上的高压电池冷却系统

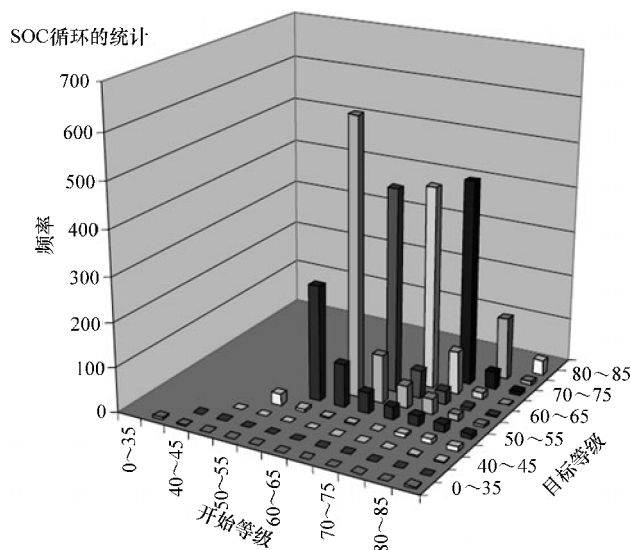


图 6.51 某一等级的充电循环频率

15km/h 以下时，起/停功能可以使发动机停止工作。一方面，因为该功能延长了发动机停止的时间，体现了油耗方面的优势；另一方面，由于可能出现的制动形成的震感被覆盖而感觉不明显，从而增加舒适性。自动变速器配备的电动附加油泵，使起/停功能可以无延迟起动，如图 6.46 所示。从车辆起步过程来看，还可称为舒适的高转速起动，这不仅有助于使停止工作的发动机重新起动，而且冷起动时，汽油在发动机达到高转速后喷入气缸，有助于明显减少有害物质的排放。

能量再生

奔驰 S400 HYBRID 的制动系统允许覆盖由车轮制动产生的及由电机产生的制动转矩，所以根据充电策略所要求蓄电池的充电状态及在各种车辆稳定措施作用下，并考虑到尽可能在车轮制动时更多地储存电能的基础上，能够完美地分配车轮制动转矩，通过使用制动踏板

行程模拟器，在同样的制动踏板位置为驾驶人提供同样的整体制动转矩。

除了制动过程，惯性行驶是另外一种能量回收的方式。在惯性行驶中，一个固定的电动制动转矩被加载到发动机制动中。然而，只可以叠加一小部分再生的能量，其原因是长距离惯性行驶对于驾驶人而言一般是难以实现的。另一个优势在于，因为电动机可防止发动机在低转速时熄火，所以混合动力汽车燃油截断阶段基本可以达到空转速度。

提速

提速是指通过电机，尤其是在转速较低的情况下对发动机进行支持，如短暂停车后再起步（绿灯起步）和低速状态下突然加速。这样一来，发动机的转矩通过电机补充：在整个转速范围内达到更高的总和、更协调的转矩变化过程，如图 6.52 所示。为了不对高压动力电池的循环稳定性产生负面影响，提速功能只有在极短时间内有极大的功率需求时，由驾驶人起动。该操作表现在相应的加速踏板位置及较大的踏板梯度。

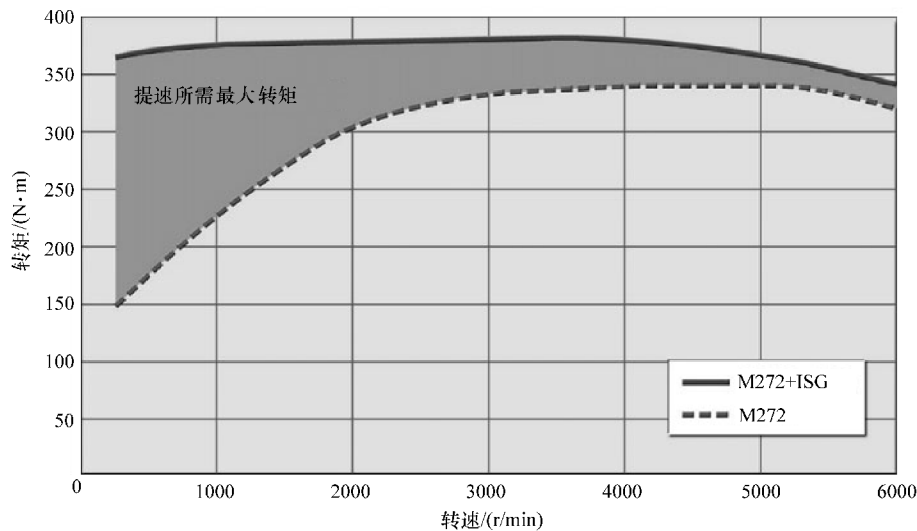


图 6.52 发动机（M272）的最大转矩及发动机 + 电机的合成转矩（M272 + ISG）

发动机、电机相结合的另一个与敏捷度无关的优点是负荷点提升，指的是发动机工作点向省油的位置移动，同时电机为填补发动机与驾驶人要求之间的转矩差。放电深度通常较低，从而使电池的循环强度受影响较小。

负荷点位移可以在高速公路上稳定行驶时较好利用，体现出混合动力省油的优势。

表 6.9 对奔驰 S400 HYBRID 和 S350 的技术参数进行了比较。

表 6.9 奔驰 S400 HYBRID 和 S350 的技术参数比较

	奔驰 S350	奔驰 S400 HYBRID
发动机	四气门 V6 汽油机	四气门 V6 汽油机
气缸排量/L	3.498	3.498
额定功率/(kW 当 r/min)	200/6000	205/6000
额定转矩/(N·m 当 r/min)	350/2400 ~ 5000	350/2400 ~ 5000

(续)

	奔驰 S350	奔驰 S400 HYBRID
压缩比	10.7:1	11.7:1
电动机/发电机		连续激励同步电机
额定电功率/(kW 当 r/min)		15kW (105V, 1500/min)
额定发电功率/(kW 当 r/min)		19kW (130V, 2000/min)
最大转矩		210N·m 在 -25℃ 时
额定转矩/(N·m 当 r/min)		160N·m, 900r/min
驱动组合		
额定转矩/(N·m 当 r/min)		385/1000 ~ 3600
能量存储		锂离子电池
电压/V		136 (35 块电极板/3.6)
能量单位/kW·h		0.8
容量/A·h		6.5
最大功率/kW		19kW
车辆性能		
0 ~ 100km/h 加速时间/s	7.3	7.2
最高车速/(km/h)	250, 电子限速	250, 电子限速
传动系统		
驱动方式	后驱	后驱
变速器	7G - TRONIC	7G - TRONIC
自动变速比	4.38/2.86/1.92/1.37/1.00/0.82/ 0.73/R1 3.42/R2 2.23	4.38/2.86/1.92/1.37/1.00/0.82/ 0.73/R1 3.42/R2 2.23
轴减速比	3.07	3.07
消耗		
燃油消耗 (市区)/(L/100km)	14.5 ~ 14.7	10.7 ~ 10.9
燃油消耗 (城外)/(L/100km)	7.7 ~ 7.9	6.3 ~ 6.5
燃油消耗 (综合)/(L/100km)	10.1 ~ 10.3	7.8 ~ 8.1
CO ₂ 综合排放量/(g/km)	242 ~ 247	186 ~ 189
排放级别	欧 5	欧 5
重量		
空车自重/载重/kg	1895/595	1955/595
允许总重/kg	2490	2550
行李舱容积/L	560	560

6.7 奔驰 ML450 混合动力

ML450 Hybrid 是奔驰混合动力汽车中第一款 SUV 车型，如图 6.53 所示。该款混合动力 SUV 以奔驰 M 系车型为基础，配备动力分配传动系统——双模式混合动力系统 AHS - C（高级混合动力系统）及两台高效电动机。AHS - C 是双模变速器，由戴姆勒、宝马、通用汽车和克莱斯勒在美国密歇根州的特洛伊市共同合作开发的双模式变速器，参阅章节 2.3。ML 450 Hybrid 的研发重点在于效率最大化的同时油耗和排放最小化。

ML 450 Hybrid



技术参数及组件

M272 KE 35(6缸汽油机)
功率: 205kW/350N·m
AHS-C-双模式变速器
带有双CVT模式 和4个固定档
2台电机功率分别为62kW、60kW
288V 镍氢电池
电子-液压助力转向系统
电动空调压缩机
最大系统功率: 250kW
最大系统转矩: 517N·m
加速时间(0~60mile/h): 7.8s
能耗降低: 约30%

功能

- 静音启动
- 起/停
- 制动能量回收
- 提速
- 纯电动
- 无级变速模式

图 6.53 ML450 Hybrid

图 6.54 所示为 ML450 Hybrid 的传动链。AHS - C 双模式混合动力系统与全时四驱相结合。镍氢高压动力电池位于行李舱备胎槽内，通过高压电线与发动机上方的电机功率电子装置相连。

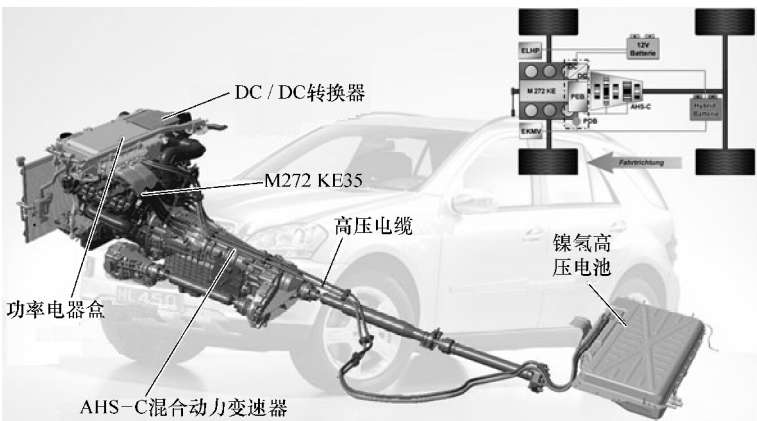


图 6.54 ML450 的 AHS - C 双模式混合驱动系统传动链

DC/DC 整流器及 APU（辅助动力系统）就在整流器旁边，由此与 12V 车载电池进行能量交换。由于混合动力汽车可以纯电动行驶，所以配备电动液压转向系统和电动空调压缩装置。由此可以取消发动机传动带驱动，传动带只作用于驱动水泵。

AHS - C 双模式混合动力变速器

混合动力系统的核心是电动功率分配双模式变速器，主要由 2 台电机（EMA 和 EMB）、3 个行星齿轮装置（PS1、PS2、PS3）、1 个油泵（EMP）以及 4 个离合器（C1、C2、C3、C4）组成，如图 6.55 所示。图 6.56 所示为 AHS - C 双模式变速器构造图。通过离合器组的控制以及 AHS 系列特有的电路连接，可以在 4 个固定式机械变速档和两个电动的变速档（EVT 1、EVT 2）之间选择。在车辆起动和低速行驶状态下，通过选择电动变速档 EVT 1 可以使车辆状态变化非常协调、非常舒适且让驾驶人和乘客感觉平稳。在稳定的行驶状态下。可以在各个速度级别下选择最有效率的固定式变速档，使该混合动力变速器达到最佳油耗的工作点。在高速行驶的状况下，通过选择电动变速比 EVT 2 模式再次达到舒适的加速和减速。通过模式选择按键，驾驶人可以自由切换成 AHS - C 双模式混合动力变速器的 E - CVT 模式和常规手动变速器模式（8 档变速）。

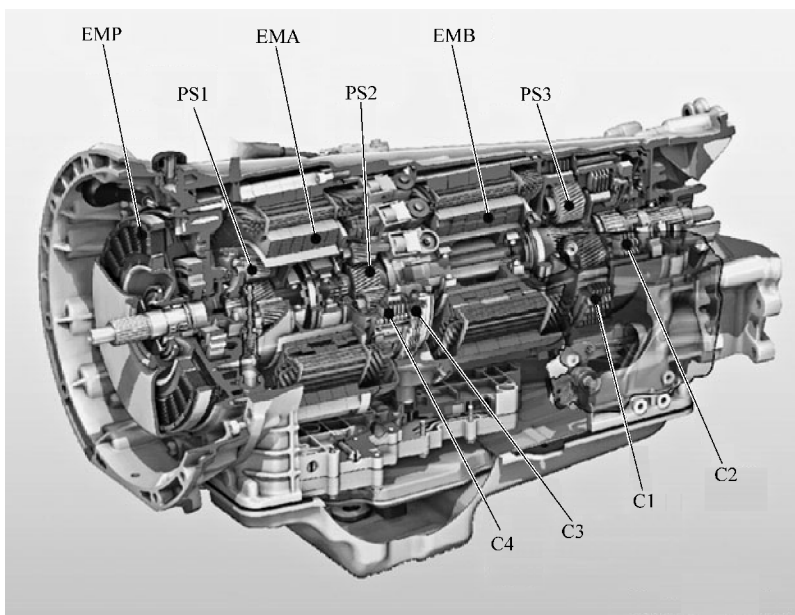


图 6.55 AHS - C 双模式变速器的剖面图

该变速器的详细功能和换档可能性已经在章节 2.3 “功率分流式混合动力”进行了描述。

电机

由于两台电机在变速器中的位置和特殊的功率需求，得出图 6.57 所示的两台电机有不同的安装要求。电机 A 由于其直径大、位置靠前，且特别对功率和最低损失进行了优化；电机 B 通过增加长度为车辆电动起步提供了高转矩、高功率密度和最大转速，且比较容易

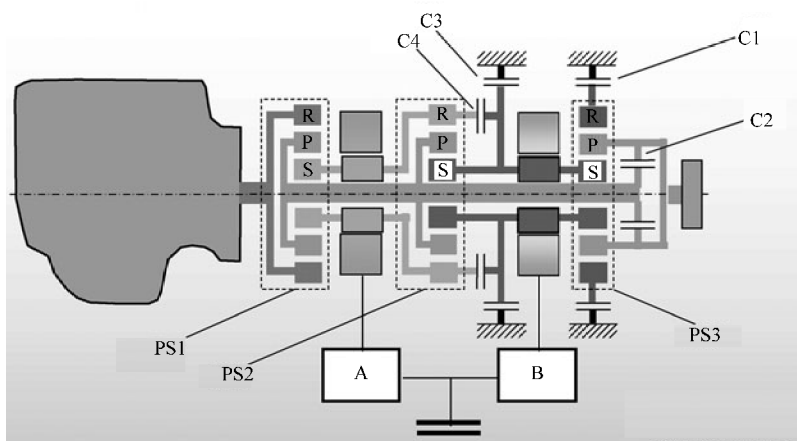


图 6.56 AHS-C 双模式变速器构造图

集成在变速器中。

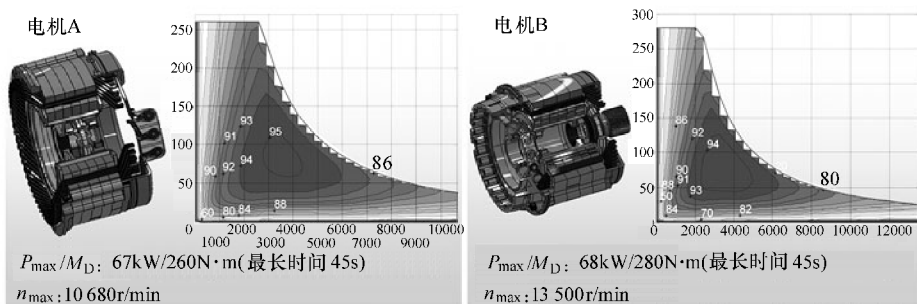


图 6.57 在 AHS-C 双模式驱动中的电机效率场图和技术参数

两台电机同为带永磁转子磁场的三相同步电机。永久磁体的结构为 IPM（内部永磁体），嵌入在转子叠层铁心。这种结构除了保证高转速稳定性以外，对转矩和功率进行了优化，减少高转速下的损失。连续充分利用磁阻转矩优化电动机转矩。转子中磁体的排列为 V 形以及其特殊的磁场定向规则，最大限度地优化磁阻转矩，从而达到上述峰值。减少噪声功能由转子设计上始终避免产生齿槽转矩来实现。

定子中的矩形波导管的排列为所谓的“发卡式”排列，该排列方式通过充分利用铜线及特殊的冷却技术允许出现转矩和功率的最大值。绕组头和定子轭部集合体的冷却方式是：通过变速器润滑油将电机基本上由铜损和铁损累积的废热带走，废热来源于：

- 1) 在转矩相关的低转速范围内在绕组头产生的热量。
- 2) 在高转速范围内在定子轭部产生的热量。

由此，导体中的电流密度为 $23 \sim 26 \text{ A/mm}^2$ ，铁心中的磁密度为 1.8 T ，使电机在动力电池提供的约 300 V 工作电压下出现如下特点：

- 1) 电机 A (EMA): 67kW/260N·m (最长时间 45s), 最大转速: 10 680r/min;
- 2) 电机 B (EMB): 63kW/280N·m (最长时间 45s), 最大转速: 13 500r/min。

镍氢高压动力电池

ML 450 HYBRID 的镍氢高压动力电池为水冷式动力电池, 集成于备胎槽内, 如图 6.58 所示。该动力电池由 24 个模组共 240 个电极板组成, 额定电压为 288V。水冷式电池模组以及整合的电池冷却循环系统, 将电池热量对高压动力电池的有效功率和使用寿命的影响降到最低。即使在极端环境温度下, 也可以随时发挥电池的最佳效率。通过集成在电池模组中的冷却系统可以使动力电池内部结构更为优化。该电池单元提供的功率为 45kW, 电容量 2.4kW·h, 重量仅为 83kg。



图 6.58 ML 450 混合动力汽车的镍氢高压电池

减排技术

ML 450 HYBRID 这款为美国市场量身打造的混合动力 SUV 是在奔驰位于美国塔斯卡卢萨的生产车间生产的。为了使该车的排放严格控制在 SULEV 排放极限值内, ML 450 HYBRID 配备了最佳的排气装置。三元催化转化器的容量为 4.7L, 比基本车型多 2L。同时也增加了催化净化槽的数量并加厚了贵金属涂层, 由此可以使车辆在使用寿命内都能将排放控制在最严格的排放极限值内。为了避免油气蒸发排放, 该款混合动力车配备零油气蒸发活性炭罐系统。该系统与 AHS-C 双模式混合动力系统相结合, 使 ML 450 HYBRID 在部分行驶时段实现零排放。由此可以获得 AT-PZEV (先进技术参数零排放车型) 认证。总而言之, ML 450 HYBRID 满足最严格的排放标准, 其排量获得零排放车辆 ZEV 银标, 参见章节 3.1.1。

6.8 宝马 X6 ActiveHybrid

宝马 X6 ActiveHybrid 是宝马、奔驰和通用汽车联合开发的双模式混合动力驱动系统的另一个应用实例。与奔驰 ML 450 HYBRID 不同的是, 该车为运动车型。虽然同样采用了

AHS（高级混合动力系统）变速器，但宝马 X6 ActiveHybrid 由于配备了 V8 双涡轮增压发动机以及极具运动气质和驾驶乐趣的运行策略，使其具有完全不同的个性。图 6.59 为该车的传动链：转矩为 $600\text{N} \cdot \text{m}$ 的 V8 双涡轮增压发动机、AHS 变速器、法兰连接的分动器以及行李舱内的高压动力电池，包括主控制器和功率电子装置的中央电力电子盒位于发动机上方。

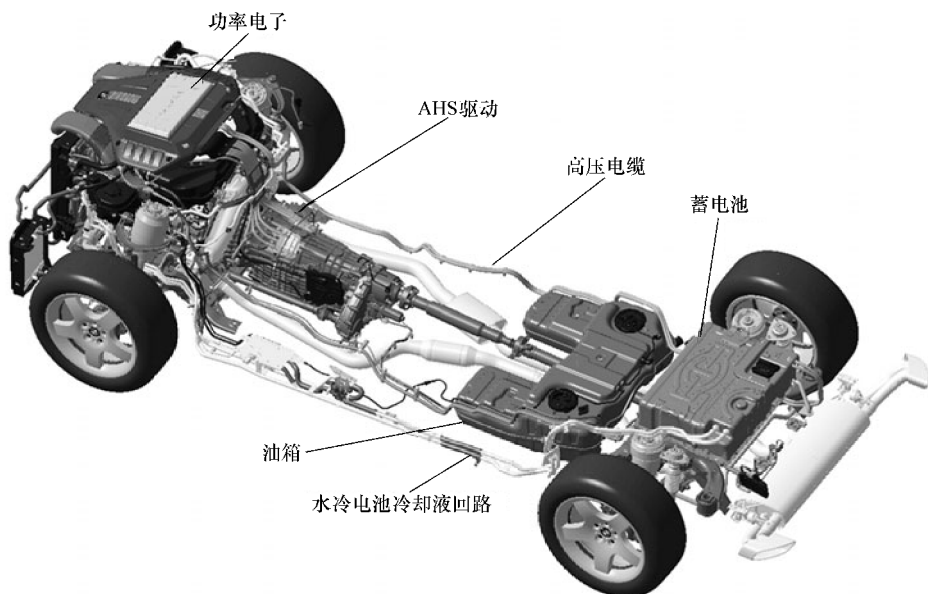


图 6.59 车尾搭载高压动力电池的宝马 X6 混合动力驱动

双模式变速器的功能性已经在章节 2.3 中进行了介绍。两台电机的最大功率为 67kW ，最大转矩为 $280\text{N} \cdot \text{m}$ 。两个 E-CVT 工作范围（模式 1/模式 2）覆盖两个变速比范围。模式 1 允许从起步点到固定的第二变速档过程中产生高速比，从而产生高驱动转矩。模式 2 覆盖第二个固定变速档以上至超速档速比（即第四个固定变速档）。在模式 2 中，电功率传输的份额降低了约 20%，通过提高系统效率达到单模式系统的水平。虽然 AHS 变速器功能上相当于一个 E-CVT（电动连续无级变速器）和 4 个附加的固定变速档，但是为了在 X6 ActiveHybrid 上保持宝马特有的行驶性能，必须配备变速比不连续的变速器。除了起步过程以外，7 个灵活行驶的变速档确保了熟悉的与速度成正比的转速体验，见图 6.60。考虑到二级变速的最佳协调程度，还通过对电机转速的控制，在 4 个固定变速档中间模拟 3 个虚拟变速档位。由于这 3 个虚拟变速档在电功率路径中会产生损失，因此只用于短暂过渡。

对于一个通常的直接速比连接，即使是在虚拟变速档，也需要一个稳定的转速控制。为了增加制动能回收，到达推进阶段的另一个超速档时，发动机转速再次降低到 $900\text{r}/\text{min}$ 。

变速档变化使部分负荷范围内牵引力在空档状态下达到最佳的舒适度。短期使用了电池功率以后，变速器输出功率保持恒定，发动机转速通过电机的辅助达到目标转速，如图 6.61 所示。

在满载加速时，为了提升动力，除了电机以外，宝马 X6 ActiveHybrid 还有一个额外的离合器。在运动型无级起步过程中，输出转矩通过一个与电动机平行的可切换的转矩线路并

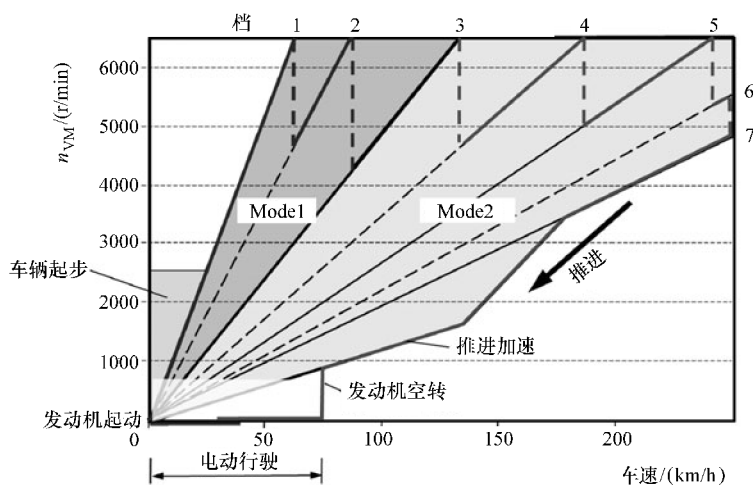


图 6.60 在 4 个固定档和 3 个虚拟档的速比区间的电动行驶和推进加速

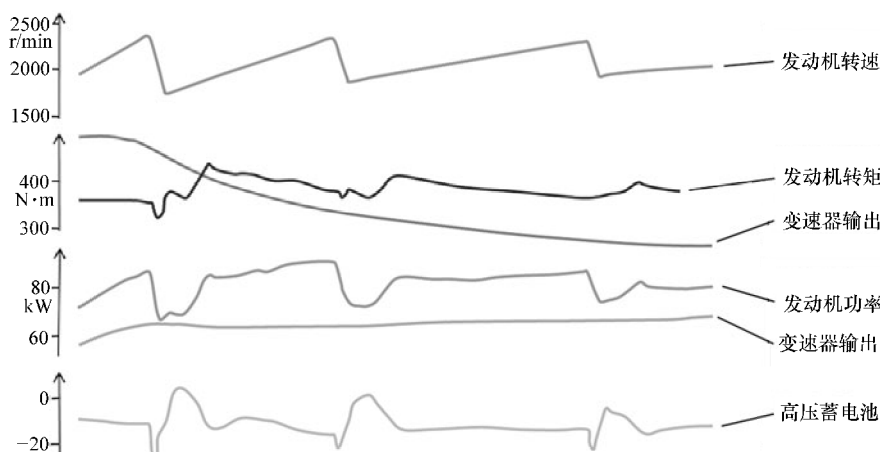


图 6.61 换档过程中的转速、转矩和功率

借助于滑动的离合器而增加，因此可以尽快达到第一个固定变速档，形成最大提速。为了在接下来的从 1 档迅速切换到 2 档的过程中避免牵引力中断，暂时作用在输出轴的离合器转换成滑动操作，从而对输出转矩进行支持。

为了尽可能地省油，速度在 65km/h 以下且蓄电池电量充足时，采用纯电动行驶模式。当纯电动行驶不能满足较高的车速时及加速时，发动机启动且平稳地衔接到相应的转速。动力电池通过采用一个负荷点提升的运行策略在牵引和制动过程中进行充电。

宝马 X6 ActiveHybrid 采用 260 块电极板串联的镍氢高压蓄电池作为动力电池，如图 6.62 所示。每个动力电池内有两个重叠的盒子，每个盒子由 13 个带 10 个电极板的模组构成。由此得出额定电压为 312V，总电容量为 2.4kW·h，其中 1.4kW·h 的使用时间可跟电池寿命一样长，直到电池寿命终结。该镍氢电池重 85kg。安装在行李舱隔板下，不受车辆外形的变化影响。

电池壳体内还包括电池控制装置、冷却剂单元、保险装置、预充开关和保护材料。

该动力电池为水冷式电池，水泵集成在电池壳内。用于冷却电池的能量首先由空气/水热交换器导出，如图 6.63 所示。在炎热气候条件下，为使电池达到足够的冷却效果，该冷却回路通过一个冷却器与空调压缩机相连，并为实现高再生功率、高提速功率、较大的电动续驶里程和必需的可重复使用性提供先决条件。

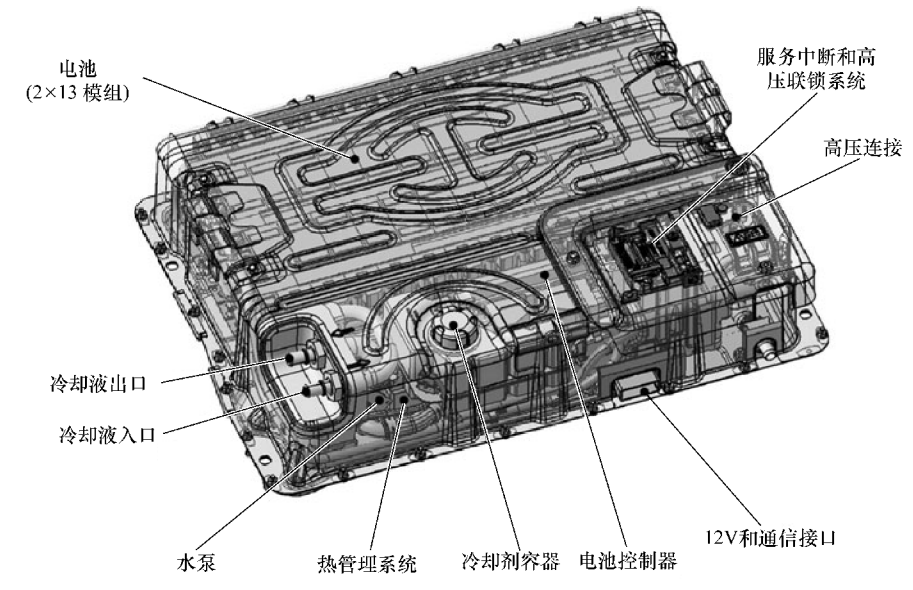


图 6.62 宝马 X6 ActiveHybrid 的镍氢高压电池的接口和组件

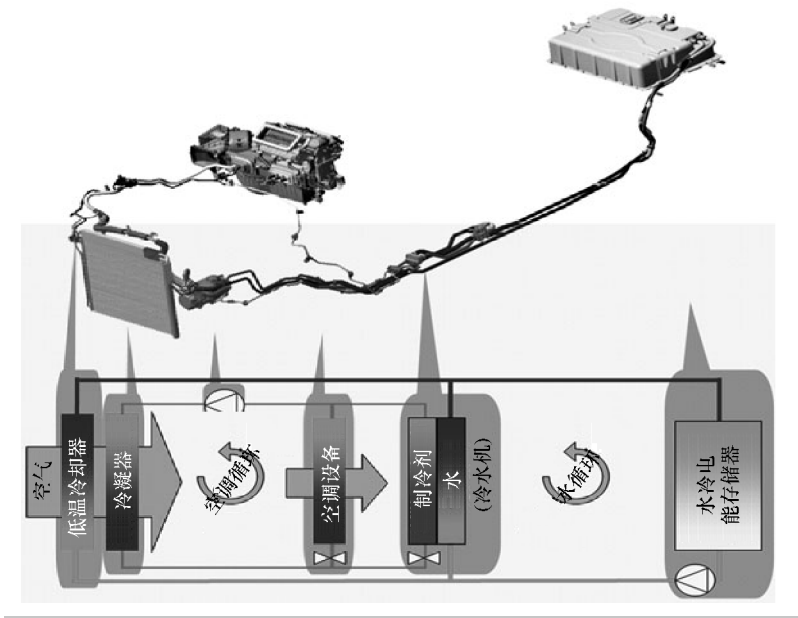


图 6.63 宝马 X6 ActiveHybrid 的电池水冷回路与空调循环相结合

运行策略及混合动力功能

宝马 X6 ActiveHybrid 运行策略的研发不仅是为了达到卓越的驾驶性能，而且是要以明显降低油耗并使驾驶人和车内乘客都能体验到电动行驶为重点。比如从速度较快的快速道驶入小镇再驶出，这一过渡路段可以采用纯电动行驶，而发动机停止运行。前面介绍过，宝马 X6 ActiveHybrid 的纯电动行驶速度达 60km/h，包括可以加速至跟随车流，同时发动机处于减速或静止时段。

各种参数决定各个混合动力功能。所有子系统的效率特性曲线都由相关的软件提供。一个软件模型为所需的传动功率不停地比较发动机和电机的效率，并按其他条件，如动力电池的充电状态、行驶状况和组件状态最终确定最优的功能。图 6.64 所示为仪表板电驱动储备显示器，以及使用其他跟电池充电状态相关的混合动力功能。

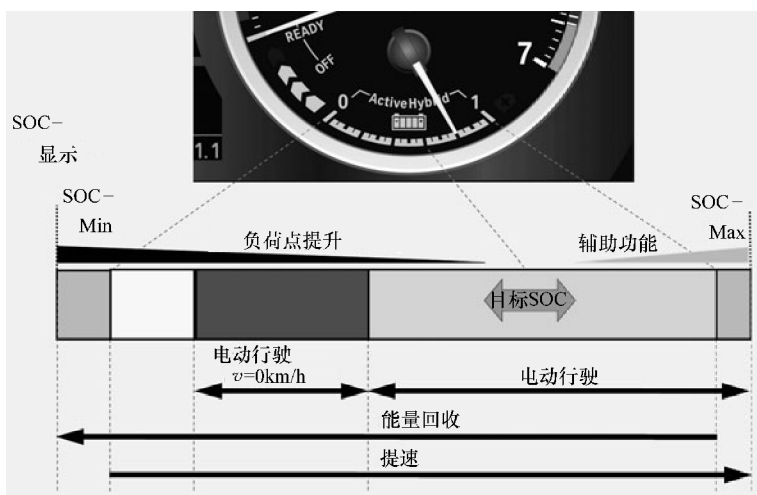


图 6.64 依赖于充电状态的混合动力功能

可明显辨认的且更突出的是电动行驶和发动机的起/停功能操作（电动行驶 $v=0\text{km/h}$ ）。动力电池电量充足时能量再生功能不可用，在蓄电池电量不足时，发动机开始工作，通过将负荷点提升至更高点为蓄电池充电。

在动力电池达到目标充电状态后，可以以 60km/h 的速度进行纯电动行驶。省油的优势不仅体现在使用所储存的电能行驶，而且体现在辅助功能的使用上。具体表现为，发动机负荷点降低，同时电机分出一部分用于驱动的转矩。“辅助功能”在使用回收的能量时有效，且在动力电池电量充足时使用，在这种情况下发动机处于运行状态中，如在高速行驶过程中。

运行策略的第二个重要组成部分——充电策略区别各种不同情况如：预热、传动程序、上坡，并设定相匹配的充电功率和电池目标充电状态。因此，它保证尽可能实现每个要求。此外，高速行驶中目标充电状态应该降低，使动力电池作好在能量再生过程中充电的准备。

图 6.65 显示出在较低的动态循环（新欧洲行驶循环）中的运行策略。由于排放的原因，发动机在一开始就运转，但是在约 70s 后停止运转。在城市路段中低于 50km/h 匀速行

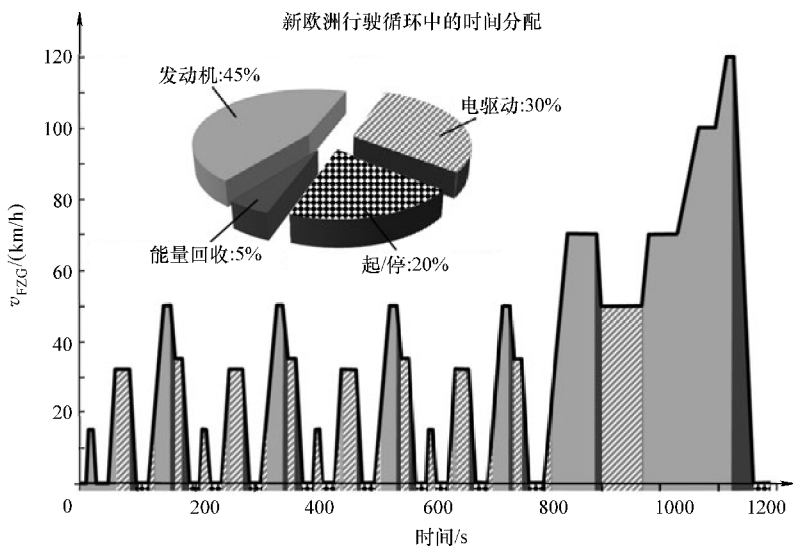


图 6.65 新欧洲行驶循环中的运行策略

驶，其中包括减速和静止阶段，无需发动机工作。发动机在速度大约 15km/h 开始加速时启动，经过城镇过渡路段以 50km/h 匀速电动行驶。

与同款常规动力车辆相比，宝马 X6 ActiveHybrid 的省油优势与用途密切相关。在相当低的动态循环（类似新欧洲行驶循环）可以达到省油约 20%，在中等动态循环中（美国）约省油 15%，在以客户为导向的欧洲行驶测试中，高速公路行驶比例大，同款比常规动力省油约 10%。

6.9 麦格纳 HYSUV

在未来的混合动力汽车市场上，SUV 拥有巨大的潜力。由于这个原因，作为混合动力产品和车辆整体发展的技术型企业，麦格纳斯太尔以奔驰 ML350 作为匹配麦格纳混合动力系统的基本车型，如图 6.66 所示。

图 6.67 为动力总成拓扑结构的原理图。在纵向传动链中，将在发动机和自动变速器中间加入一个模块，如图 6.68 所示。该模块（所谓的 E4WD 即电动四驱系统）由两台电机 EM1 和 EM2（根据不同的结构变型）具有多达 4 个湿式膜片式离合器（K1 ~ K4）组成，如图 6.69 所示。闭合三个离合器形成并联式混合动力、电动前桥以及串联式混合动力。闭合离合器 K4 可以使两台电机为驱动前桥和后桥叠加转矩。

E4WD 电动四驱系统结合了具备双离合拓扑的常规并联式混合动力，及前桥可去耦的电动驱动单元的功能性。4 个离合器和 2 台电动机结合发动机、变速器和由驾驶人操作，可具有 21 个合理且行之有效的工作模式。在这些模式中还包括由并联式混合动力和电动轴模式相结合的串联式混合动力模式，并实现全时四驱，如图 6.70 所示。为了挖掘省油减排的潜力，所有常规混合动力功能，如负荷点提升、起/停功能、能量再生和提速（四轮）都是必备的。由于前桥、后桥都支持纯电动驱动，两个混合动力电动驱动（HED）单元必须是全四

象限兼容的。



图 6.66 麦格纳斯太尔 HySUV 混合动力样车

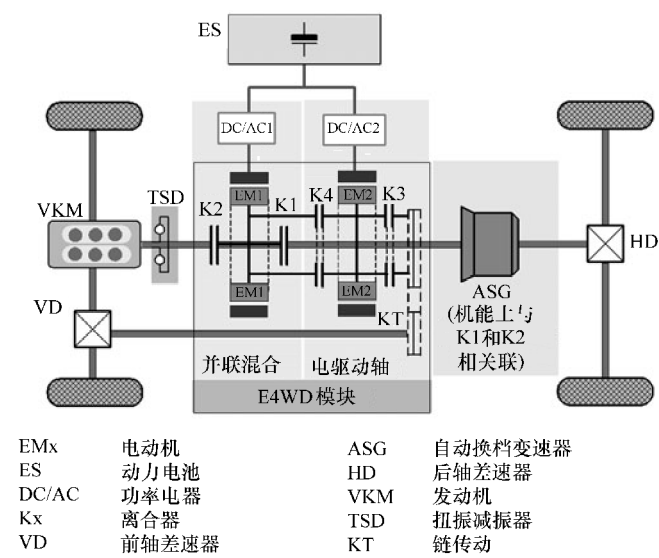


图 6.67 HYSUV 传动链的简图

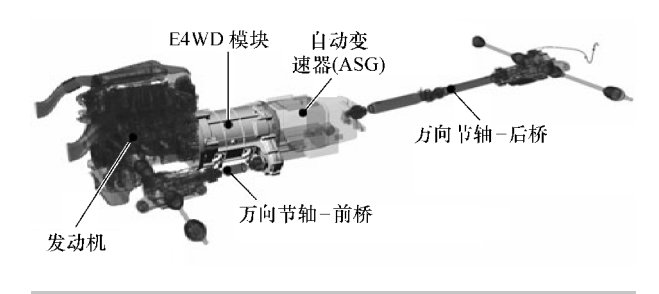


图 6.68 带有 E4WD 模块的传动链

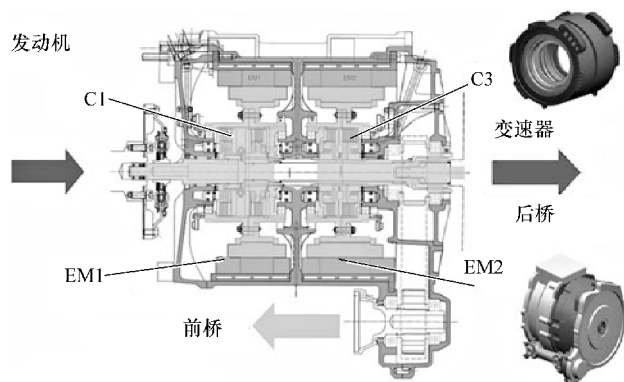


图 6.69 E4WD 模块

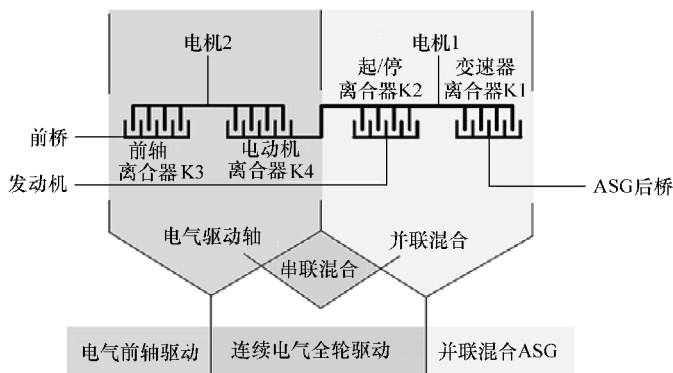


图 6.70 E4WD 模式下的多功能描绘（带离合器）

所组装的 HYSUV 作为样车的目的是优化其功能性和积累经验。要在今后进行量产还需要简化组件和特征，以降低重量并节省成本。

6.10 大众途锐混合动力

技术条件决定了 SUV 和越野车比常规车辆的油耗高。为了突破这一技术，大众为途锐系列开发出除纯汽油机和柴油机版以外搭载汽油机的混合动力车型，如图 6.71 所示。但目前市场上找不到公开的图像资料，尚无法说明此举能提供给用户高于平均水平的节能型汽车，但也将是一款节能型混合动力 SUV。

除了降低油耗并且能够纯电动行驶以外，大众研发这款混合动力 SUV 的目标还包括：保持途锐传统传动链的性能和功能性甚至有所改善。该混合动力样车的平均油耗小于 9.0L/100km，CO₂ 排放量小于 210g/km，与同样规格的常规 SUV 相比，该样车在城市交通中省油超过 25%。在城市、郊外快速道和高速公路行驶平均省油 17%。此外，途锐 V6 TSI 混合动力符合欧 5 标准和美国 ULEV2 排放标准。

大众途锐混合动力 SUV 为常规的并联式全混合动力。图 6.72 所示为其传动链。由新的

V6 TSI，即一台机械增压直喷式汽油发动机和电机提供动力。V6 TSI 的途锐混合动力版可在转速 5500r/min 时提供 245kW 的功率，并从 3000r/min 转速开始从 2.995L 的气缸容积获得最大 440N·m 的转矩。

混合动力传动链的部件以混合动力模块的形式位于发动机和变速器之间，如图 6.73 所示。



图 6.71 大众途锐混合动力 SUV

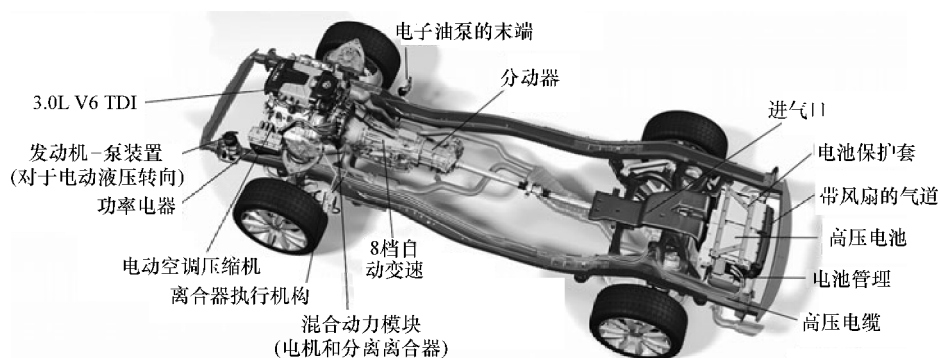


图 6.72 大众途锐混合动力的传动链

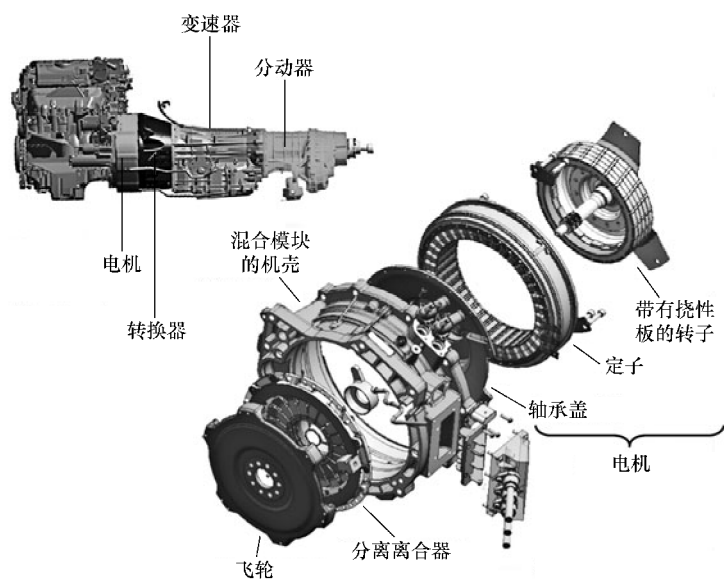
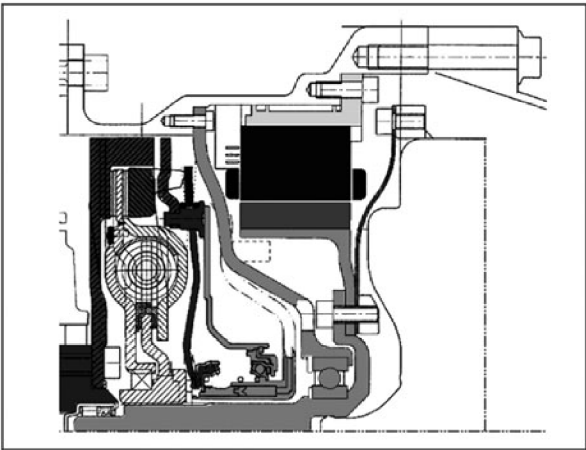


图 6.73 大众途锐混合动力的并联混合传动链组件（无车轴）

混合动力模块

该混合动力模块在一个共同的壳体内，包括发动机下游的干式分离离合器 K0，及集成的扭振减振器，液压中央分离装置和功率为 34kW 的电机。电机的转子通过一个所谓的挠性板与自动变速器的变矩器连接，保留了传统传动链中的自动变速器和变矩器。图 6.74 所示为混合动力模块截面及其主要参数。

通过位于飞轮后的分离离合器 K0，可以使发动机和电机之间去耦，从而实现电动行驶。发动机不配备单独的起动机，而是由电机通过分离离合器从静止或电动行驶状态中经由复杂过程起动发动机。起动和关闭发动机的分离离合器通过一个主轴促动器进行控制。相应的控制算法存储于混合动力控制单元管理器中，与发动机控制器集成在一起。



长	145mm
外部直径K0	264mm
发动机转矩范围	450N·m
电机类型	同步电机
功率	34kW
转矩	300N·m
电压	288V

图 6.74 混合动力模块的剖视图

变速器

途锐系列变速器也是途锐传动链的重要组件，实践证明转矩可达 $800\text{N} \cdot \text{m}$ ，因此无需为转矩为 $450\text{N} \cdot \text{m}$ 的发动机和转矩为 $300\text{N} \cdot \text{m}$ 的电机组采取转矩增强措施。只需变矩器和跨接锁止离合器根据具体要求与现有的组件组合在一起。

混合传动链的运行需要安装一个额外的电动变速器油泵（EOP），其目的在于在发动机关闭的情况下保证为变速器提供润滑油，因为自动变速器的机械油泵只有在转速高于一定的最低转速时才可以保证由变矩跨接锁止离合器和离合器 K1 产生足够的加压，用于转矩传输。为了在纯电力驱动模式下可以由电机驱动且无需滑动的变矩器情况下起步，变矩锁止离合器和离合器 K1 必须在输入转速大于“零”的情况下耦合，自动变速器传动。

为了抵消混合动力组件的一部分重量（约 175kg ），该样车与途锐常规车系相比进行了若干修改。其中一个例子就是 $4 \times \text{MOTION}$ 全时四驱。在常规途锐通过分动器与可锁定的中央差速器将传动力驱动力传递到前桥和后桥。途锐 V6 TSI 混合动力采用一个轻便的托森式限滑差速器代替两级式分动器，也用于奥迪 Q7。作为牵引车辆的最佳特征，途锐的自身技术优势能够保持完全不变。

电动机

途锐混合动力采用的同步电机电压 288V 、机械功率 34kW 、最大转矩 $300\text{N} \cdot \text{m}$ 。

离合器 K0 的从动盘通过一根短传动轴与电机转子相连。转子通过该传动轴和经过润滑处理的轻型球轴承连接到与混合动力模块浇铸在一起的轴承盖上。

分离离合器 K0

作为干式单盘式离合器，分离离合器 K0 的功能按照“常闭”原则。其基本结构与常规起步离合器基本相同，然而飞轮、离合器从动盘和离合杆更适合应用于混合动力。

为了便于重新启动发动机，飞轮的几何尺寸非常重要，形成尽可能小的惯性矩。采用双质量飞轮（DMFW）的技术自动被排除。取而代之的是带 30° 最大扭转角的扭转减振器，其功能是隔离发动机旋转的不规则性。

使用一个电动液压主轴促动器对分离离合器 K0 进行自动化控制。这一技术中起决定性作用的是考虑到混合动力汽车起动发动机的次数远高于常规车辆。主轴促动器的核心是无刷直流电机。该电机驱动滚珠丝杠，进而使液压活塞产生压力和容量变化，如图 6.75 所示。

该促动器装配了一个无自锁的滚珠丝杠。为了避免快速运转造成滚珠脱落导致内部构件（活塞、主轴等）损坏，该部分配备了发动机制动器。无刷直流电动机固定在主轴上，为了测定该电机的位置，配备了两个角度传感器。此外为了对该部分进行初始化和位移传感，还采用了线性位置传感器、一个开关点传感器以及备选的压力传感器。

主轴促动器中内置的电子元件，一方面对直流电机进行控制，另一方面跟集成的传感器一起形成一个活塞位移调节回路。整个系统由此形成一个“智能”促动器，一侧为电功率输入和电子设定值输入，另一侧为控制下的液压功率输出端，额定值输入作为总线连接点。

该主轴促动器通过集成在发动机控制单元里的“混合动力管理器”进行控制。

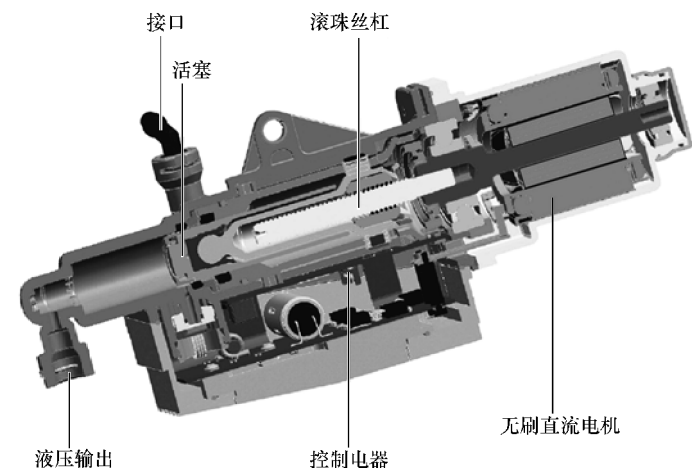


图 6.75 主轴促动器剖面

动力电池

风冷镍氢电池作为动力电池具有 240 个电极板，额定电压 288V，位于备胎槽中，如图 6.72 和图 6.76 所示。该动力电池电容量为 $1.87\text{kW} \cdot \text{h}$ ，充电状态范围在 30% ~ 70%，即 $0.75\text{kW} \cdot \text{h}$ 为可用电容量。

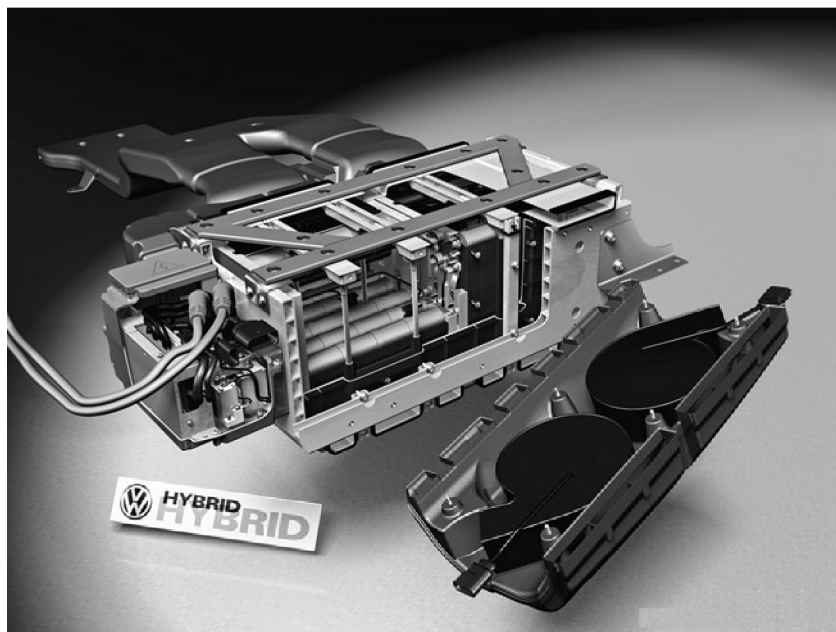


图 6.76 大众途锐 Hybrid 的风冷镍氢电池

通过途锐车内通风系统中集成的附加风道及两个独立的通风装置，电池温度可控制在最佳工作温度范围内。动力电池自重 67kg。“保护盒”用于在碰撞事故中保护动力电池。整个

动力电池系统重 79kg（包括保护盒和通风装置）。

混合动力控制装置

混合动力控制装置集成在发动机控制器中，其原因是发动机控制器具有足够的运算能力和存储空间。混合动力控制装置采用以转矩为基础的软件结构，根据驾驶人愿望和子系统（如辅助装置或电子稳定程序等）的要求计算出所需的发动机－电机转矩。

因此运行策略通过系统中可用的能量和子系统的效率，来确定油耗最低的行驶模式。当需要改变现行的行驶模式时，需要发动机起动或停止。行驶模式的改变是发动机、电机、分离离合器及变速器共同作用的结果，并通过相应的程序控制进行协调。以发动机运行和去耦为出发点得出如下行驶模式，如图 6.77 所示。

	能量输送	能量存储
发动机起动	提速 非稳态平衡	运行点后移
发动机分离	电能供应	
	电驱动 第一次起动 再次起动	能量回收

图 6.77 驱动类型

电器消耗提供电力支持形成了一个基本负荷，其用电量影响行驶模式的选择。此外，还要考虑到一个电源和转矩储备用于重起发动机。图 6.78 所示为在各个模式中的能量流和驱动形式。

以下部分对行驶模式及其特征进行描述：

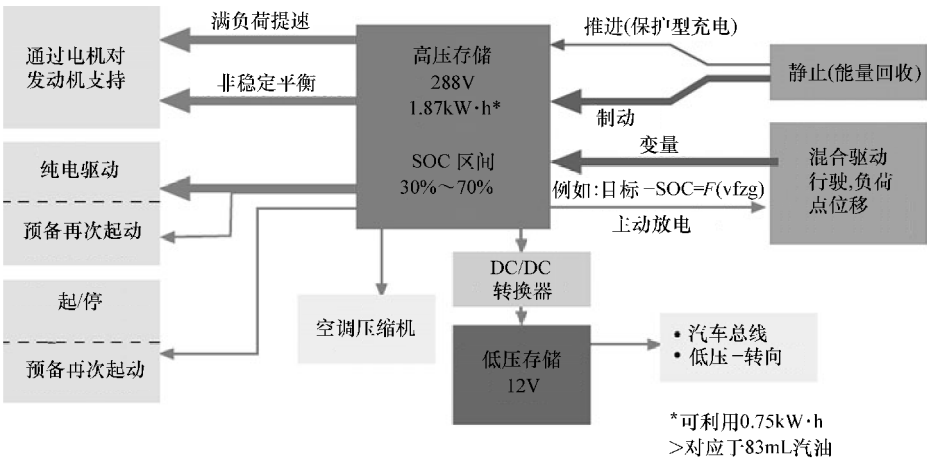


图 6.78 能量流和驱动形式

非稳态平衡

电机是一台反应灵敏且高效的转矩生成装置,且满足同样质量的正负转矩需求。在瞬时工作状态下,发动机的调整速度无法满足额定的强度(如增压过程),或效率较低(由于换挡或 ESP 干预造成点火时间延迟,从而造成转矩减小)时,需要使用电机,来快速改变转矩,并达到良好的效率。该过程被称为非稳态平衡,其特点是短时间内提供的电功率大,但转换的能量低,因此非常符合动力电池的“能量供给”。图 6.79 为非稳态平衡的工作原理及进一步提速和充电的原则。

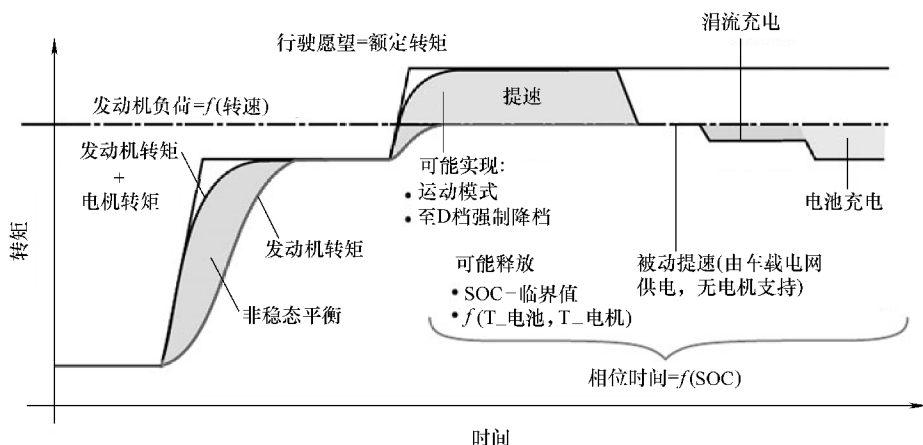


图 6.79 非稳态平衡/提速/充电的原则

提速

提速过程中,通过电机可提高由常规的发动机全负荷输出的最大可供车轮转矩。车辆性能可由此得到显著改善。减档或选择“S”档时,出现的短时功率为 275kW,最大转矩上升至 550N·m,如图 6.80 所示。

在这种情况下,途锐 V6 TSI 混合动力样车 0~100 km/h 加速仅需 6.8s。提速有“主动”和“被动”之分:主动提速是指电机向传动链提供一个发动机以外的转矩;被动提速是指电机转矩保持不变,同时仅由动力电池为电机提供电能。

电动行驶

由于其零排放和低噪声等优点,电动行驶模式被认为是作为全混合动力汽车的一个

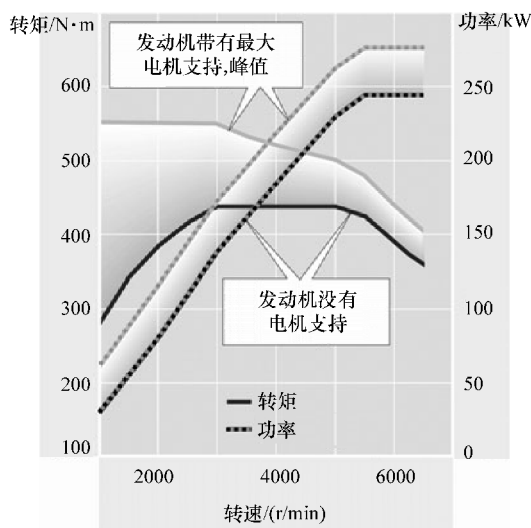


图 6.80 有/无电机支持的发动机最大功率和转矩

典型特征，同时也满足了用户的要求。只有达到整体效率（包括车辆起步）高于纯发动机驱动产生的效率时，电动行驶才是合理的，即使多次能量转换产生损失。电动行驶操作范围相对较小。因此，当有降低噪声和零排放需求时，驾驶人可以在电力系统允许的范围内按下电动行驶按钮。该技术下，电动行驶的工作范围必须为电机保留一个用于起动发动机的转矩储备。

发动机起动

发动机重起的品质影响动力总成的舒适性。对单轴并联式混合动力而言在此有一个特别的挑战，因为分离离合器、液力变矩锁止离合器和所有的与动力啮合相关的离合器都必须在发动机起动时受到控制。从电动行驶或能量再生结束后，通过运行策略来传递发动机起动的要求。运行策略起动一个顺序控制器，用于协调发动机、分离离合器、电机和变速器等子系统的起动顺序。

当出现发动机起动请求时，变速器中的变矩锁止离合器将进入滑移位置，同时电机的转速增加到变速器控制单元设定的额定值。然后发动机控制单元接收到对分离离合器进行操作的许可。分离离合器闭合后，发动机受到电机牵引，并在气缸进气可达到额定转矩后喷入燃料和点火，进而起动发动机。在牵引过程中，电机转矩同时随着分离离合器即时传递的转矩得到提高，在发动机起动后电机转矩增加速度减缓。因此，变速器输入转矩和车轮转矩保持在由驾驶人所需的设定值。分离离合器动力啮合，变矩器锁止离合器被再次闭合。详细阐述请参见章节 2.2.3 电动行驶。

这个基本上保持一致的发动机起动过程现在能在舒适度和动力学定位上进行衡量，在此过程中每个基本过程的时长都有所不同。驾驶人通过对加速踏板的操作形成的不同要求，并得到有效执行。

负荷点位移

动力电池通过回收制动能进行充电，或当上述方法不可行时，由发动机驱动发电机发电。发动机的负荷点因此通过克服行驶阻力所必需的措施而得到提升，同时生成的过剩的转矩为动力电池充电。工作点是根据局部效率和电力系统的能量需求进行定义的。混合动力汽车发动机在工作点的效率可以在起/停功能和电动行驶的共同作用下明显优于同样工作点下的常规车辆效率。无充电需求时，发电机的发电转矩用于满足辅助装置的功率需求。

能量再生

回收制动能是最省油的动力电池充电方式。通过最小化动力总成中的推进力转矩，直接利用汽车滑行行驶的动能可以有效地利用能量。在牵引过程中，断开的分离离合器使发动机和动力总成断开，从而使发动机的牵引损失不会影响整体效率。能量再生只通过驾驶人操作制动踏板激活。

6.11 AVL ECO Target 混合动力

ECO Target 混合动力目标是开发一款适用于自重为 1350kg 的中级车的传动链，如图

6.81 所示。排放目标是符合欧 4 排放法规,达到新欧洲行驶循环中将施行的每公里二氧化碳排放量 90~120g 的要求。与基本的动力总成(2L 柴油机配备 5 速手动变速器)相比,舒适性和驾驶性能方面稳中有升。该中度混合动力系统的结构如图 6.82 所示。



图 6.81 AVL 公司中度混合动力演示车辆 ECO Target

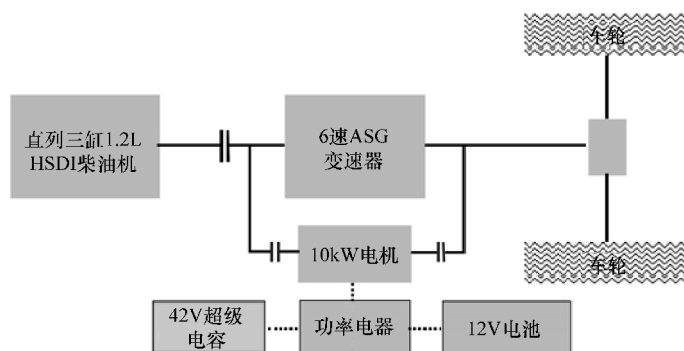


图 6.82 ECO Target 的传动链

该款中度混合动力汽车的动力由一台排量 1.2L 的小型化发动机(瘦身版)提供,再配备 6 速手自一体变速器(ASG)。连续输出功率为 10kW(最高输出功率 25kW,可持续 5s)的 42V 电机通过中间齿轮箱与 ASG 变速器相连。中间齿轮箱通过啮合使电机一侧连接至驱动轴,另一侧连接 ASG 变速器从动轴。相对于曲轴上的电机而言,ECO Target 技术具备的优势为手自一体变速器在离合器范围内结构长度并没有增加,这一点对于前置横向发动机的应用上尤为重要。ECO Target 的电机是一个独立的、可进行自身优化且不依赖于变速器的单元。位于曲轴上的系统,比如优化异步电机定子(位于变速器内)和转子(在曲轴上)之间的间隙尤其困难,总是导致效率的损失。

由处理器、整流器和 DC/DC 转换器组成的功率电子装置位于中间齿轮箱上。作为动力电池采用的是 150 双层电容器(超级电容),位于变速器上方,固定于一侧车身内,如图 6.83 所示。功率电器及电机的冷却系统与发动机冷却回路集成在一起。

电机同时作为起动机和发电机,因此无需单独配备这两个组件。此外,当发动机与其摩擦功率断开时,该电机还可以回收(再生)制动能,该情况在曲轴系统上只能由第二离合器实现。ECO Target 的另外一个重要特点是电机可以在换挡时填补断开的牵引力,这就体现出手自一体变速器的舒适性。由此获得的换挡舒适程度接近于液力变矩式自动变速器。选择超级电容而不是 42V 动力电池的原因在于,使电机在短时间内非常强的电流下既可作为电动机也可以作为发电机工作。其优势既体现在提速和换挡时的牵引力支持,又体现在能量再

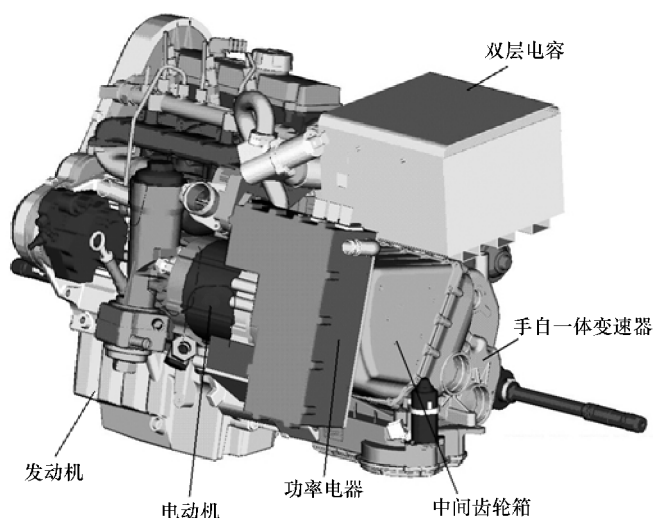


图 6.83 ECO Target 传动组件

生过程。然而该超级电容的电量低于动力电池，因此不支持电动机长时间工作。该能量管理策略是使超级电容尽量多次短时间充放电，正好符合该超级电容的特性。

通过调整气缸工作容积（小型化）及采用手自一体变速器形成负荷点位移，使发动机在新欧洲行驶循环中具有明显较高的负荷，以及相应的热力学效率。然而，由此产生的较高负荷导致氮氧化物排放超标。因此，燃烧过程的研究发展的重点是优化燃烧相关参数，如活塞、盆形燃烧室、压缩比、喷油器特性及凸出部分结构、废气再循环率、增压以及喷油压力 and 对应发动机高负荷比的边界条件下的喷油开始时间。

图 6.84 为变速器中齿轮组示意图。离合器通过离合杆控制，并由一个电机驱动的离合执行器完成。换档同样也由电机驱动。通过每 2 个齿轮级操作两个控制筒实现换档和脱档。其中一个控制筒分配到倒档和 2、4 档，另外一个分配到 1、3、5 档和 6 档。该换档技术大大缩短了换档时间。由于相邻的档位位于不同的控制筒，可以在脱离起始档位的同时极快地切换到目标档位，由此缩短换档时间，而在此之前只有通过液压操作实现。跳减档（如从 5 档直接减至 3 档）也能很快完成，因为无需换至中间档。

电机通过中间齿轮箱与手自一体变速器耦合。从电机产生的动力流通过两个齿轮级（第 4 级和第 3 级）传递到中间轴，中间轴上为行星齿轮第 2 级和第 1 级的两个转换轮。这两个转换轮可以通过档位 R/2/4 的控制筒换档，所以在此无需额外的传动机构。第 2 级通过第 4 变速档的固定齿轮使电机与驱动轴相连。在该档位，可以起动发动机。第 1 级使电机与驱动轴相连，由此可以进行提速。由于电机的转速可达 20 000r/min，所以必须特别注意这类啮合以及轴承和壳体的结构。

ECO Target 的功能

跟传统传动系统相比，在 ECO Target 上配备电机获得以下附加功能：

- 1) 快速，低噪声，低排放起动发动机；
- 2) 发电功能为 12V 和 42V 车载电网供电；

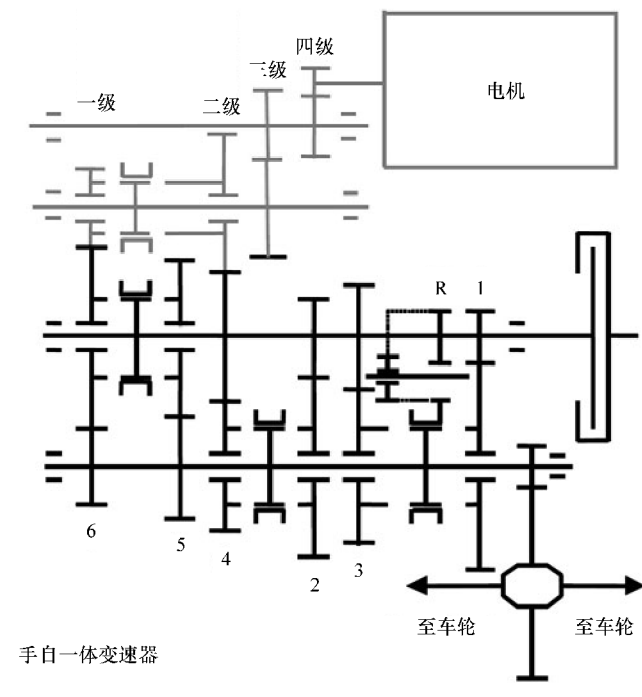


图 6.84 齿轮系简图

- 3) 能量再生（通过电动制动或发动机推进模拟进行制动能量回收）；
- 4) 起/停功能；
- 5) 换挡过程中的牵引力支持；
- 6) 对车辆起步进行电力支持；
- 7) 提速；
- 8) 脉冲起动。

6.12 AVL Turbohybrid

AVL 公司的涡轮增压混合动力（Turbohybrid）是一项采用汽油机的创新混合动力技术。章节 3.2.1 已经介绍过，负荷点升高是特别有效的省油措施。原则上可以通过另一种传动设计（例如：较长的轴传动比或双离合器变速器以及相应的可能性，在循环中优化换挡点）达到负荷点升高，从而降低油耗达 5% ~ 10%（这取决于基本传动装置的设计）。在传统传动装置中，要实现这样的省油潜力就只能牺牲一定的驾驶性能（较长的轴传动比、排量降低）或增加成本（双离合器变速器）。

在并联式混合动力汽车，由于采用有助于降低油耗的变速器和轴设计带来的驾驶性能的损失，在很大程度上可以通过电力附加功率得到补偿（取决于电池容量），在这方面约 15kW 的电功率成为该车型主要的省油潜力。混合动力驱动的效果不限于起/停功能和能量再生，同时通过对传动装置的整体优化使该车型明显具有更大的省油潜力。电功率对车辆性能的支持的关键在于其持续性，而不会因为电池电量低而受限。AVL 的解决方案是在一辆中级车的并联式混

合动力系统中配备一台涡轮增压汽油机以及功率约为 15kW 的电机。这款概念车选择 2006 年版宝马 320i 作为载体,如图 6.85 所示。



图 6.85 AVL 公司的涡轮增压混合动力汽车

传动系统配备一台 1.6L 排量的涡轮增压直喷汽油机 (GDI - tc)、双离合曲轴混合动力模块、一个手动变速器、一个高压蓄能器 (双层电容器——DLC, 也可以由锂离子电池代替) 和一个混合动力控制中心及相关调节策略,如图 6.86 所示。

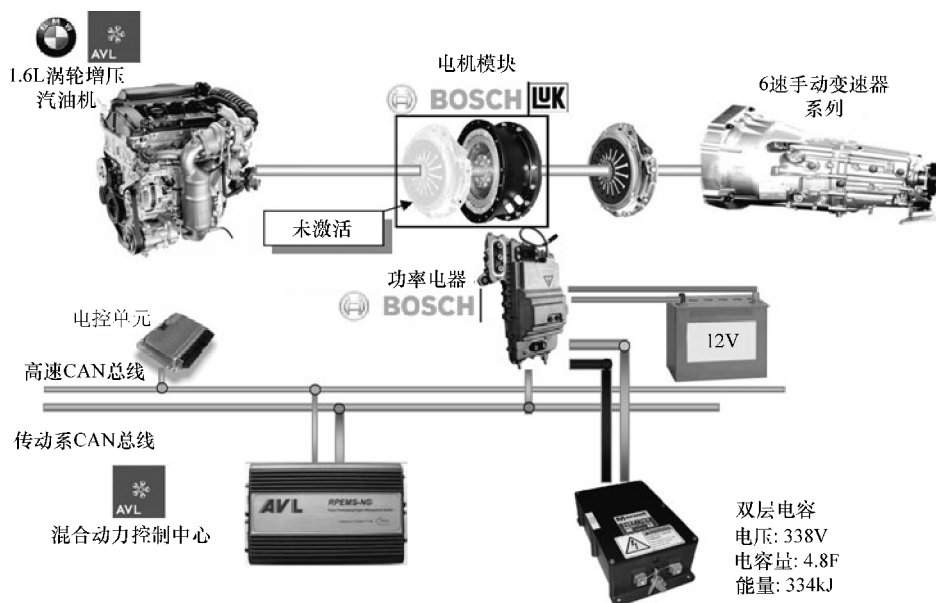


图 6.86 AVL 公司涡轮增压混合动力方案——第一结构分级

结构分级 1 有如下配置：

- 1) 1.6L 排量 GDI - tc 发动机；
- 2) 6 速手动变速器及长轴传动比；
- 3) 起步离合（第二个，分离离合器未激活）；
- 4) 双层电容器（334kJ/93W · h）；
- 5) 15kW 曲轴起动发电机（电力有限）；
- 6) AVL RPEMS - 混合动力控制单元样机。

为了证明该项混合动力技术的效率，在此对排量 1.6L 的涡轮增压直喷汽油机与排量 2.0L 自吸发动机进行了比较。由于涡轮增压发动机的转矩明显较大，因此具有更长的变速比和相应的省油性能。虽然其变速器结构同样可以达到最大牵引力，但低转速范围内也有所不足，如图 6.87 所示。该发动机在动态加速下（图 6.87 中所示为第 3 档）的弱点被涡轮增压动力进而放大。以驾驶灵活性为出发点，在此配置中驱动装置是不能被接受的，必须采取额外措施在行驶特性方面加以改进。

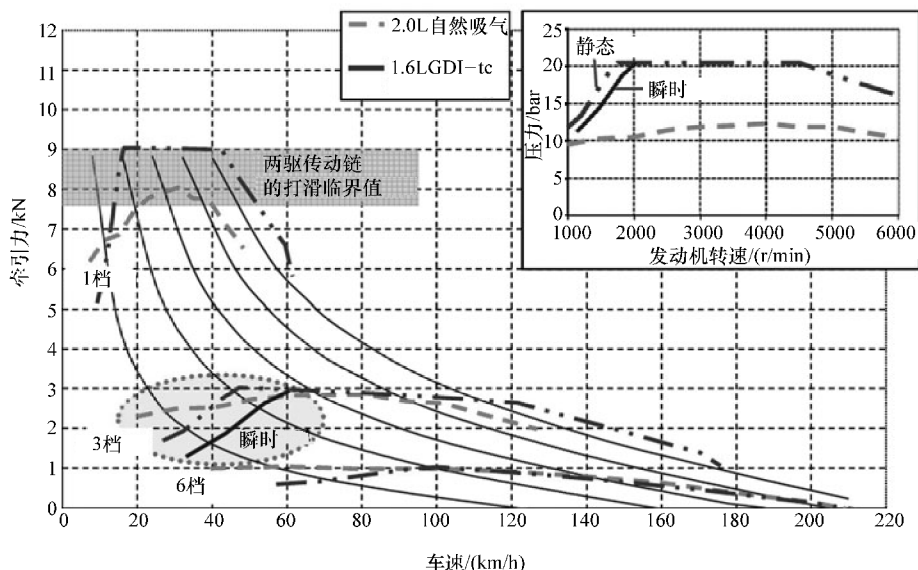


图 6.87 牵引力曲线（1.6L GDI - tc 发动机与 2.0L 自然吸气发动机的比较）

此措施就是采用电力驱动进行弥补。图 6.88 为 AVL 涡轮增压混合动力汽车的全负荷性能特点。

当排量 1.6L 的 GDI - tc 发动机与一台功率为 15kW 的电机联合驱动时，得出一个理论值，正如图 6.88 中所示的发动机和电机转矩之和。而电力驱动仅在低速和瞬时的情况下用于始终保持驱动转矩为发动机最大转矩。

尽管涡轮增压混合动力汽车的变速比明显较长，但相对而言，其牵引力等于甚至超过常规驱动系统，如图 6.89 所示。因此在瞬时情况下也能具有同样甚至最佳的驾驶性能，从而保证了车辆的灵活性和驾驶乐趣。

上文提到，电机必须在任何情况下都能提供转矩支持，也就是说动力电池需要保持相应

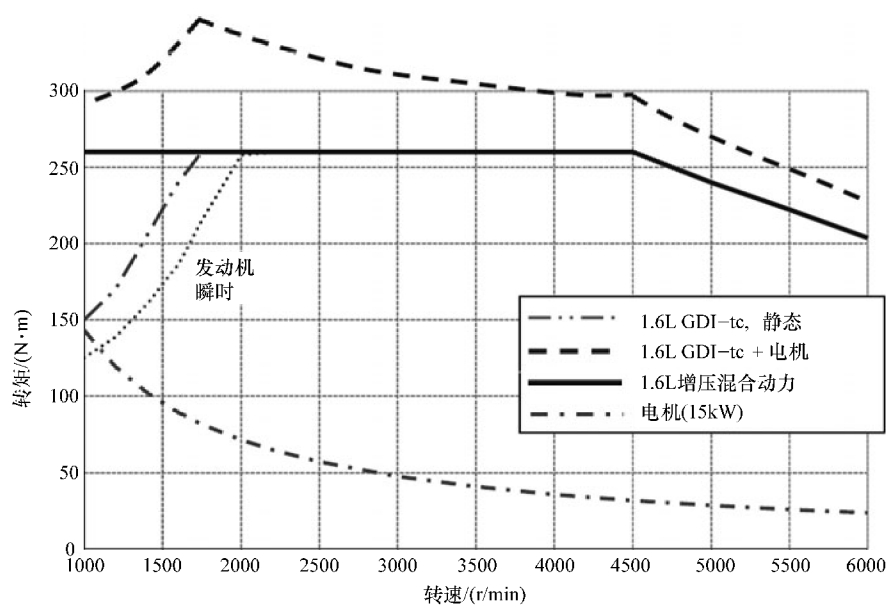


图 6.88 AVL 增压混合的全负荷特性

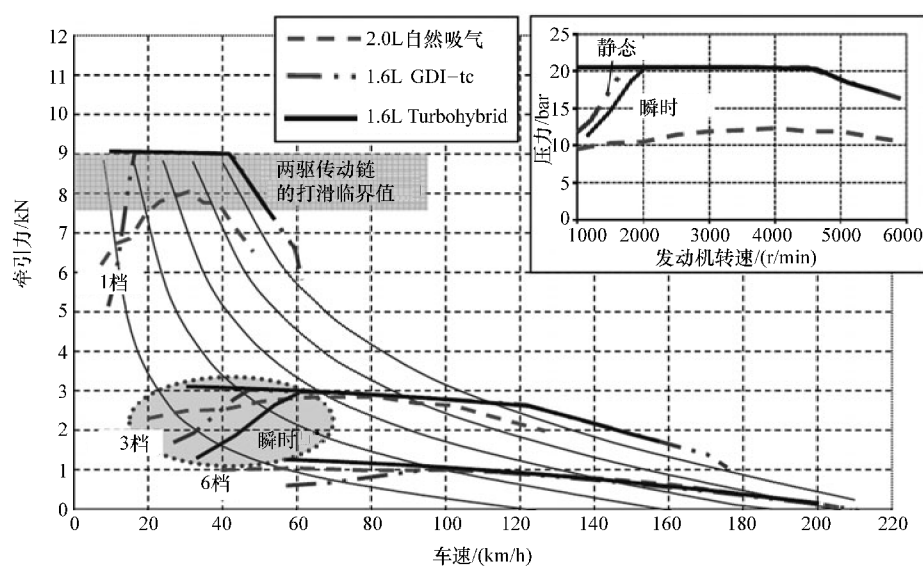


图 6.89 AVL Turbohybrid 牵引力示意图

的充电量。为了实现该目的，AVL 公司将涡轮增压混合动力系统与智能充电策略相结合，使动力电池在全负荷加速的情况下也能够充电。这样一来，发动机在高转速范围内获得电能用于电动机，在发动机低转速范围内为其提供支持，如图 6.90 所示。如此，加速过程可以

保持能量平衡,进而即便动力电池电量低,也能达到同样的加速性能。其前提是发动机的增压性能(即短时间超过固有全负荷水平的发动机转矩)。过剩的转矩用于动力电池充电。剩余的推进力并非必须用于增加转矩。该充电策略仅应用于动力电池电量较低的情况下。

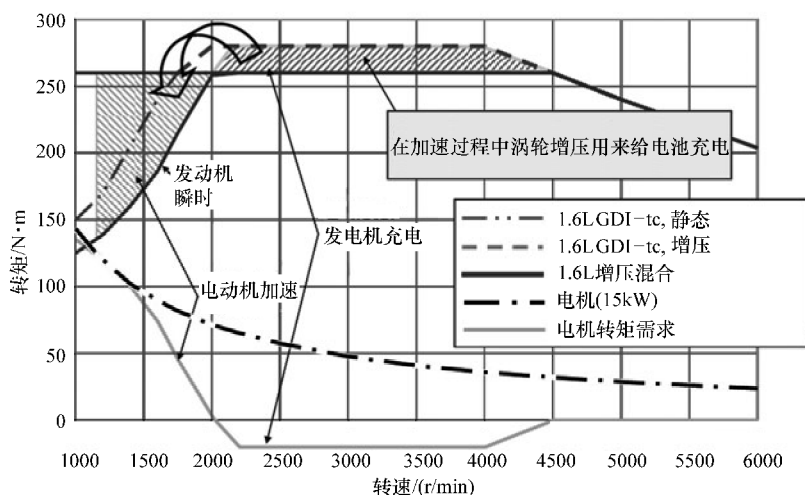


图 6.90 AVL 增压混合的全负荷特性——增压

为了验证车辆性能,换至 3 档从 30 ~ 90km/h 的满载加速过程中对不同设置进行比较。图 6.91 为无电机支持下得出的结果。起始转速 1000r/min 导致显著涡轮迟滞,所以约 5s 后是在发动机的最大驱动转矩才可用。整个加速过程需要 10.5s。

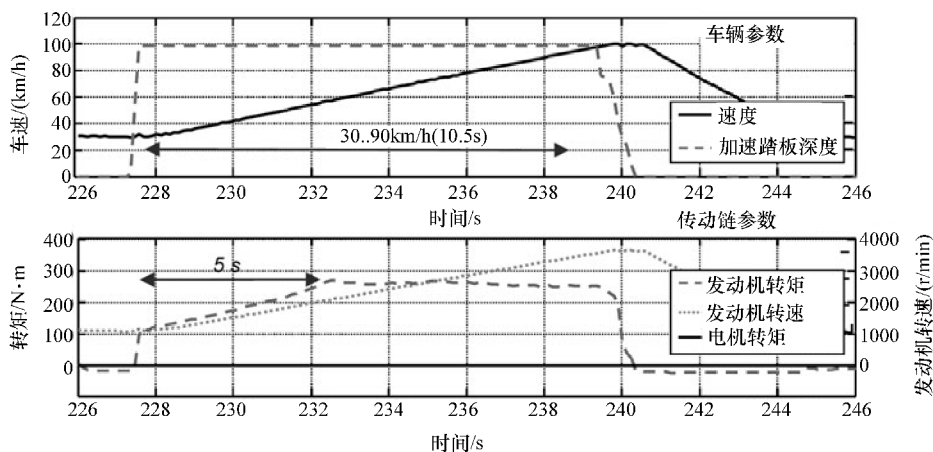


图 6.91 3 档全力加速从 30 ~ 90km/h, 无电机支持的测量值

如图 6.92 所示,在电机支持下,即使在低转速情况下也可以立即支配最大驱动转矩(只受制于舒适度相关的驱动系统颠簸程度)。3.5s 后达到发动机最大驱动转矩(提速范围),整个加速过程时间为 8.5s。在达到最大转矩后,发动机在增压范围内工作,过剩的转矩用于动力电池充电。该充电模式只有在动力电池低电量状态下使用,以保证重复加速性能。

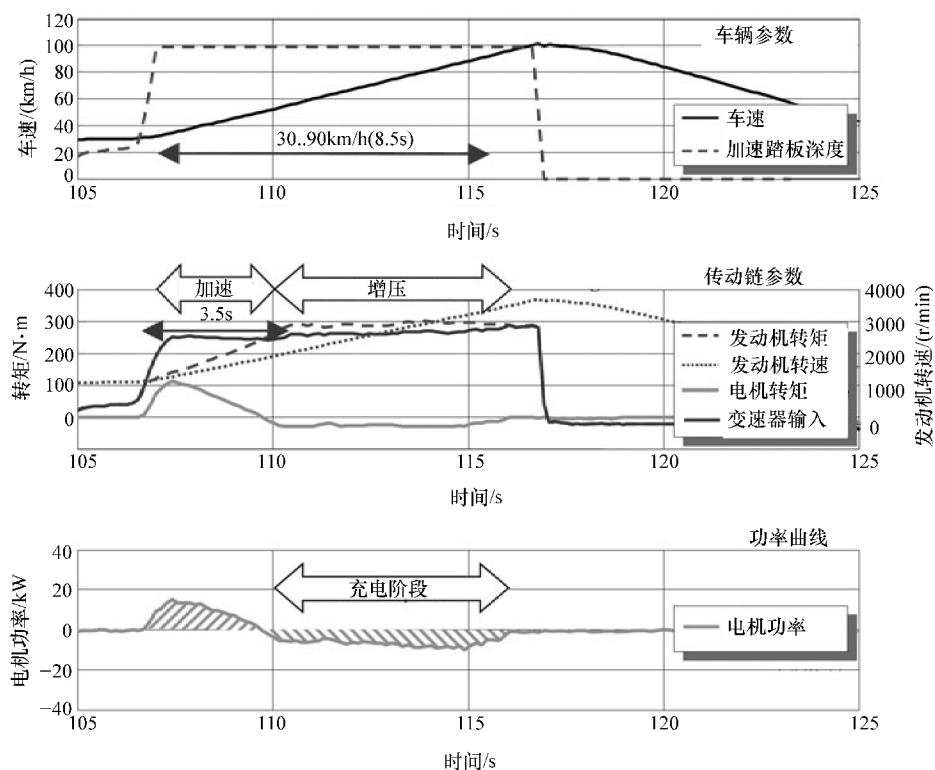


图 6.92 3 档全力加速, 30 ~ 90km/h, 带有电机支持和增压功能

对于不同车型, 在理想行驶阻力的转鼓式测试下, 对不同的涡轮增压混合动力技术进行比较 (参考车辆为 2008 年款宝马 320i MT6), 以排除不同车辆的影响。

根据新欧洲行驶循环对油耗和灵活性 (即驾驶乐趣) 进行测试。对车辆灵活性的评测以 AVL-DRIVE 车型为基础。

在同样的行驶阻力下, 对以下车辆进行测量:

- 1) 宝马 320i, 排量 2.0L, 自吸式分层稀薄燃烧过程、起/停功能、智能车载电网管理、MT6 (参考)。
- 2) AVL 涡轮增压混合动力, 加 100kg 的附着重量 (下一个飞轮质量级)。
- 3) 功率分配式全混合动力汽车 (配备电动 CVT), 对参考车辆而言, 参考 175kg 的附着重量 (下一个飞轮质量级)。

与参考车辆相比, 由于较长的轴传动比形成负荷点位移, 使涡轮增压混合动力汽车更为省油, 如图 6.93 所示。配备常规驱动装置的车辆由于行驶动力学方面的瞬时无法达到这一优势。不仅省油, 涡轮增压混合动力车辆具有更多驾驶乐趣。凭借第 2 个离合器 (分离离合器——更好地利用能量再生功能) 并结合自动变速器, 使该混合动力车辆的省油潜能再提升 7%。相比全混合动力车辆, 涡轮增压混合动力车辆的整体装机电功率较低, 其驱动系统的额外费用也较低。

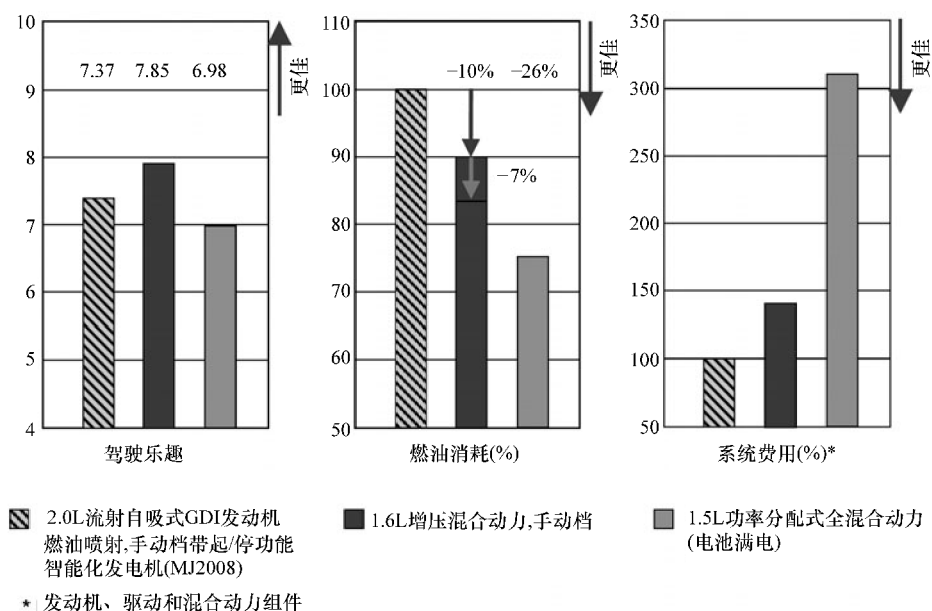


图 6.93 以宝马 320i 为参照, 比较三款车辆驾驶乐趣、新欧洲行驶循环中能耗及造价

6.13 欧宝 Flextre 和 Ampera

除雪佛兰 Volt 以外, 欧宝 Flextre 是通用汽车公司另一款混合动力概念车。该车型采用 E-Flex 动力总成架构, 如图 6.94 所示。该系统的核心是配备排量 1.3L 的柴油机和锂离子动力电池的串联式混合动力系统, 其动力电池的纯电动续航里程为 55km。电池电量较低时, 排量 1.3L 的涡轮增压柴油机起动, 将整体续航里程提高至 715km。涡轮增压柴油机保持在最佳转速范围内, 其气缸压力为基础的闭环技术控制燃烧过程, 由此进一步降低有害物

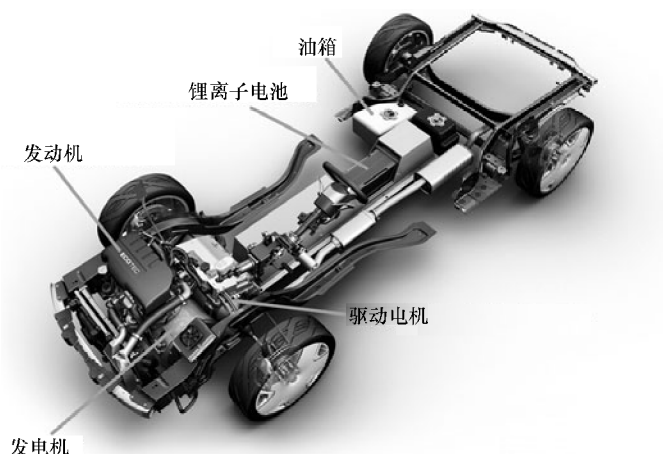


图 6.94 欧宝 Flextre 车型的传动链结构

质排放。根据欧洲行驶循环（ECE R101），该系统的排碳值为 40g/km，见表 6.10。

表 6.10 欧宝 Flextrime 概念车的技术参数

车型	欧宝 Flextrime 概念车
车身和驱动	两厢四座轿跑车车体，前轮电驱动
驱动系统	
原则	带增程器的电驱动，传统插座方式充电
电池系统	
类型	磷酸锂电池
能量	16kW · h（最小）
峰值功率	136kW
电压	320 ~ 350V
充电时间	3 ~ 3.5h，220V 电网电压
电驱动系统	
电力峰值功率	120kW
机械峰值功率	120kW
电力持续功率	45kW
机械持续功率	40kW
最大转矩	370N · m
发电机	
峰值功率	53kW
驱动方式	直接
增程器	
类型	四缸增压柴油机 CDTI
排量	1.3L
峰值转速	3200r/min
油箱容积	26.5L
充电设备	
类型	电源插头
电压/电流强度	220V/20A
纯电动续航里程	55km
根据 ECE R101 每公里排放 CO ₂	低于 40g
0 ~ 100km/h 加速时间	约 9.5s
最高车速	约 160km/h

E - Flex 系统实现了不同的驱动系统整体集成在具有电力驱动装置的底盘上。在柴油机之外，可以采用改进版氢燃料电池或排量 1.0L 以汽油或 E85 乙醇汽油（85% 乙醇和 15% 汽油的混合燃料）作为燃料的三缸涡轮增压汽油机进行辅助驱动，这取决于更容易获得哪种燃料。

通用汽车公司开创这一新系列也称为 Voltec 技术，于 2011 年应用于欧宝 Ampera，如图

6.95 所示。在该技术中, T 形锂离子电池具有多于 220 个电极板。噪声极低的电力驱动在车辆静止的情况下提供 $370\text{N} \cdot \text{m}$ 的转矩, 即 111kW 。欧宝 Ampera 从 $0 \sim 100\text{km/h}$ 的加速时间约 9s , 最高速度 161km/h 。发电机由排量 1.0L 以汽油或 E85 乙醇汽油作为燃料的三缸涡轮增压汽油机进行驱动。图 6.96 为欧宝 Ampera 的底盘和概念车。

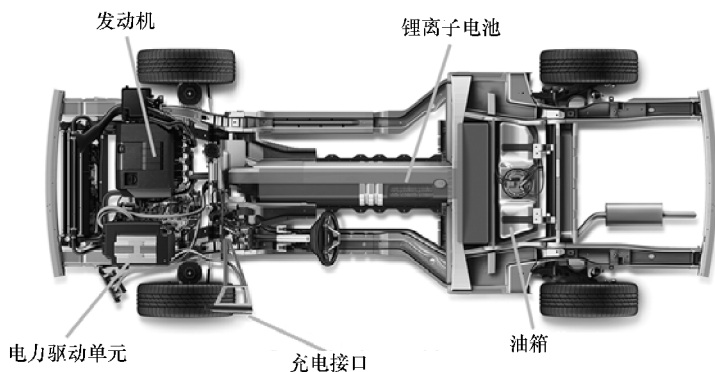


图 6.95 欧宝 Ampera 车型具有 Voltec 技术的传动链

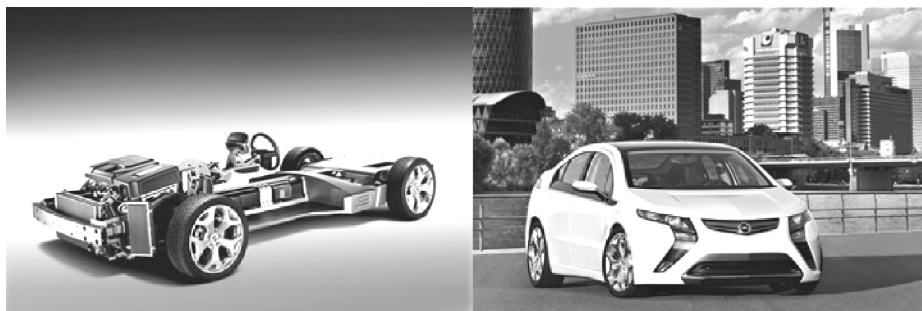


图 6.96 欧宝 Ampera 的底盘和概念车

6.14 大众插电式高尔夫 twinDrive

新型插电式混合动力技术的一个实例为大众 twinDrive, 如图 6.97 所示。所搭载的锂离子动力电池的电动续航里程为 $30 \sim 80\text{km}$, 满足短距离行驶的需求。

大众 twinDrive 驱动技术的最大特点在于, 区别于常规增程器, 其发动机可以在最大能量传输范围内通过自动离合器与驱动装置耦合, 因此其效率较纯串联式混合动力技术更高。根据第 2 章, 该技术定义为“混联式混合动力系统”, 如图 6.98 所示。该高度电气化技术的变速器功能可以减少至一个齿轮上, 无需完全放弃机械能量传输。除了混联式混合动力传



图 6.97 大众 twinDrive

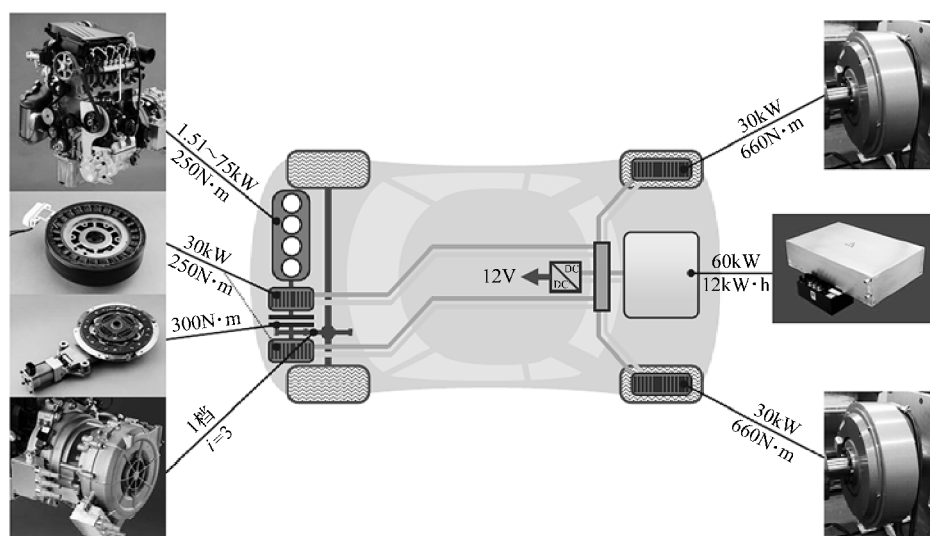


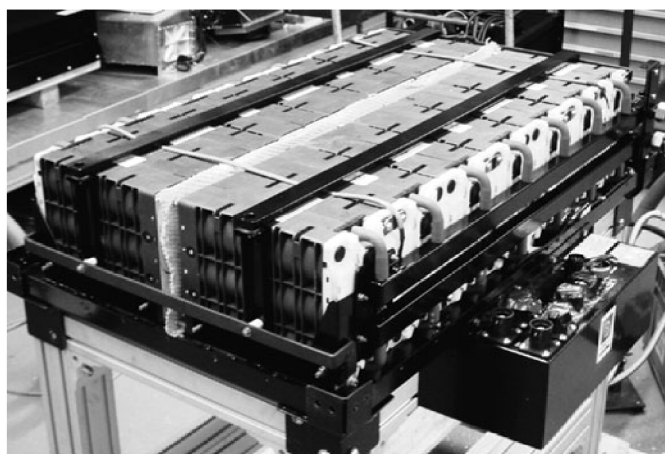
图 6.98 大众 twinDrive 四轮驱动方案

动链设计的前轮驱动以外，完成的样车还为两个后轮各配备一台附加的轮毂电机，由此形成电动全轮驱动。3 台功率各 30kW 的电机为该样车提供总计 90kW 的驱动功率。通过 3 台电机获得的车轮转矩总和为 $2000\text{N} \cdot \text{m}$ 。

大众 twinDrive 纯电动行驶采用锂离子电池作为动力电池，如图 6.99 所示。其额定电压为 300V，电容量约 $12\text{kW} \cdot \text{h}$ ，重约 150kg。可用于驱动的电池电量大于 60kW，因此在城区行驶时即使没有发动机支持，也能获得令人满意的动力。

大众 twinDrive 搭载一台排量减少的 75kW TDI 发动机，如图 6.100 所示。通过该发动机使 twinDrive 的最高速度超过 170km/h。该发动机和驱动装置中的其他电动组件在同一旋转

轴上，并可以作为内嵌式方案应用于目前的大众高尔夫和帕萨特系列车型中。



twinDrive:

锂离子高能电池组

- 额定电压302V
- 额定容量12kW·h
- 功率>60kW
- 续航里程40~50km

图 6.99 大众 twinDrive 的锂离子高能电池组

twinDrive: 基本驱动组件

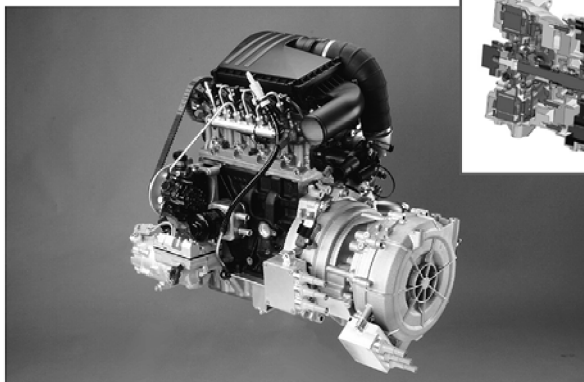


图 6.100 大众 twinDrive 嵌入式驱动组件

控制架构由 4 个软件层构成，如图 6.101 所示。最上层为环保及驾驶性能辨识。在这一层所收集的信息由策略软件层（如模块能量及功能管理）加以利用，从而有效地控制能量流，使其适应环境条件和符合驾驶人的期望值。在策略软件层对采集的信息进行定义的同时，执行层根据动态过渡状态执行命令。在这一层对诸如复杂的发动机起动任务和离合器开闭功能等任务进行处理。在最后一个软件层，根据执行软件层输出的标准值对每个转矩来源进行控制。

大众 twinDrive 有 6 种行驶模式，如图 6.102 所示。可以对纯电动模式下的电动行驶及制动能回收模式和其他 4 种与发动机联合的混合驱动模式进行区分。在串联模式下，发动机和发电机作为增程器联合发电。在此模式下，动力电池根据驾驶人对功率的需求进行充电或用于提速。在速度超过 50km/h 的情况下，twinDrive 选择联合驱动模式。驾驶人不会感觉到该耦合过程。能量直接传输到车轮，不出现额外的能量转换损失。在电动行驶模式下，可以对动力电池进行充电或由动力电池对高功率需求进行辅助。



图 6.101 大众 twinDrive – 控制架构（全轮）

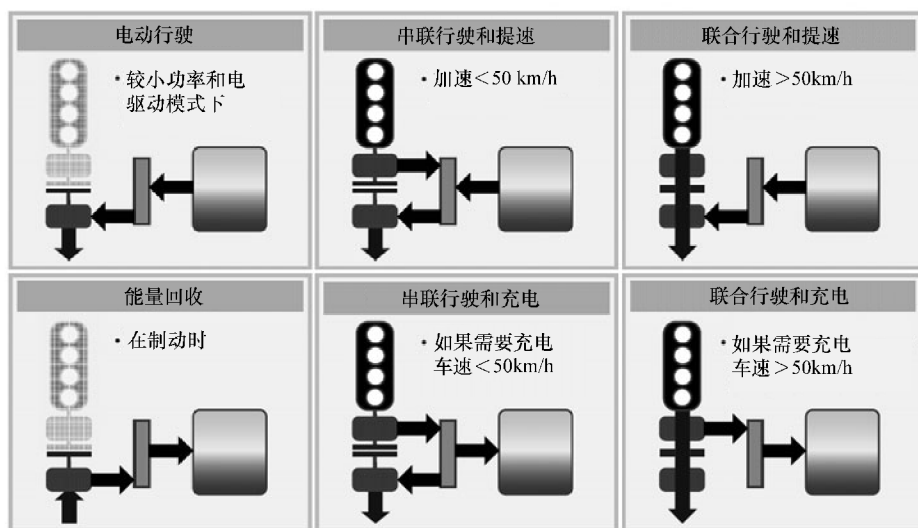


图 6.102 大众 twinDrive 行驶模式

行驶模式的选择与切换取决于当前的行驶状态和各种边界条件，如电池充电状态和驾驶人要求。例如，驾驶人可以选择通过操作导航系统界面决定当前行驶特征，直至下一充电过程。如此，驾驶人可以选择哪个路段应该或必须电动行驶。在混合动力模式下，动力电池根据当前充电状态向相符合的状态充电或放电，且由此优化利用两种能源——电能和燃料。在此，驾驶人不仅可以在导航系统设定中在已存储的路段电动行驶，也可以预设整个行驶路段直至下一个充电机会。设定的路段越短，纯电动行驶的时间越长。发动机的动力支持只出现在需要提速的时候。动力电池续航里程可覆盖的行驶距离当然也可以在电驱动功率范围内采

用混合动力模式而非电动模式行驶。在此，该适应性能量管理的目的在于使动力电池在下一个充电可能前理想地放电，进而使车辆尽量以低的油耗保证尽可能地长距离电动行驶。

图 6.103 所示为大众 twinDrive 根据速度和所需轮上功率选择的混合动力模式。

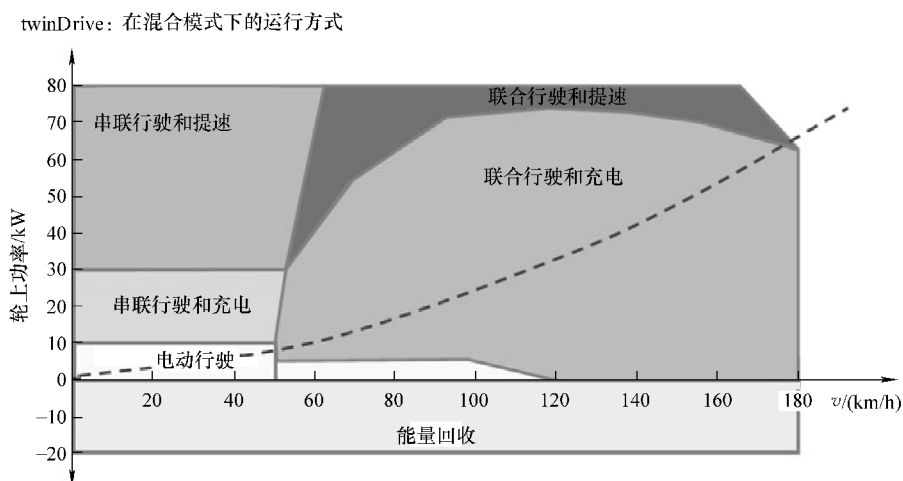


图 6.103 大众 twinDrive 在混合驱动模式下的性能

速度低于 50km/h

在速度低于 50km/h 且无强力加速需求的情况下为纯电动行驶。长距离行驶中，轮上功率需求在约 10kW 为最佳，发动机起动并联合发电机用来电动行驶或为动力电池充电发电。当轮上功率需求高于发电机的最大功率，即约 30kW 时，由动力电池提供电力支持。该行驶模式通常只在短时间加速时采用，且无大规模能量转换。

速度高于 50km/h

在高速且功率极低的情况下，如下坡路段，采用电动行驶模式。速度达到 50km/h 后，发动机通过离合器直接驱动车轮。对于大多数驾驶人而言，该模式能量转换最多。仅当行驶功率需求大于发动机满载功率时，由动力电池提供额外功率进行支持。在制动操作下，即反向负功率需求时，回收的制动能才为动力电池充电。在制动、电动行驶和车辆静止的状态下，跟全混合动力驱动一样发动机关闭。

6.15 丰田 Supra HV - R 混合动力

近些年来在赛车比赛中也开始采用混合动力汽车，如图 6.104 所示。以 Super - GT 系列为基础的丰田 Supra HV - R（混合动力）成为世界上第一辆赢得赛车比赛的混合动力汽车，早期的 Lohner 保时捷赛车未被计算在内。在 2007 年日本十圣（Tokachi）24h 拉力赛中使用的丰田 Supra HV - R 的尾部装有一台 150kW 的辅助动力电机，前轮配备两台 10kW 电机。

这 3 台电机均可作为发电机，Supra HV - R 在高速下制动时有效地回收制动能。该赛车采用的不是常规混合动力电池，而是电容器系统，该系统可以实现大电流充电、短暂储存电能以及极快速放电，从而在比赛中及时切换至全速加速和急速制动。该赛车的主要动力仍由功率 349kW 最大扭矩 510N · m 的排量 4. 8L 8 缸发动机（3UZ - FE）提供，技术参数见表 6. 11。整体功率 441kW，重 1080kg。



图 6. 104 丰田 Supra HV - R（混合动力）

表 6. 11 丰田 Supra HV - R（混合动力）技术参数

车型	GT/TP1
发动机	V8 发动机修改版（超级 GT）版 3UZ - FE 发动机
气缸容积	4. 480L
空气截流阀直径	2 × 29. 6mm
额定功率	353kW 当 6800r/min 时
额定转矩	510N · m 当 5600r/min 时
前置电机	轮毂电机
后置电机	150kW
车重	1080kg
车队	丰田 SARD 车队

6.16 比亚乔 MP3 混合动力

比亚乔 MP3 混合动力是全世界第一款量产的混合动力摩托车，如图 6.105 所示。



图 6.105 比亚乔 MP3 混合动力

比亚乔 MP3 混合动力搭载并联式混合动力传动链，由发动机和电机进行后轮驱动。主要动力来源于排量 125mL 的进气管喷射式单缸四冲程发动机及其催化转化器。发动机搭载一台电机，并通过离心式离合器与变速器相连。电机为永磁同步电机，功率 2.6kW。图 6.106 和图 6.107 为比亚乔 MP3 混合动力的动力总成和集成电机。

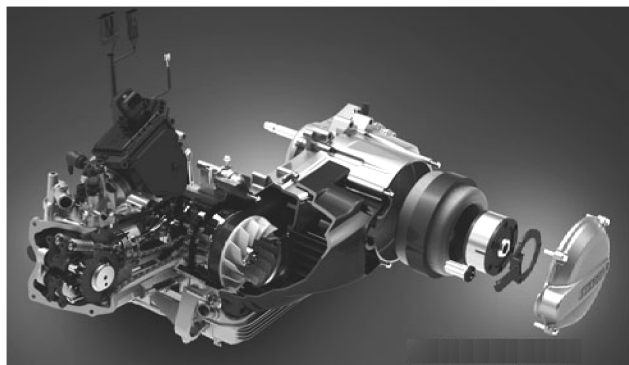


图 6.106 比亚乔 MP3 混合动力的传动链

一个创新的电子动力传动链管理系统——VMS（车辆管理系统）协调两个驱动单元的运用，从而对两个驱动单元进行电力控制（电子节气门技术），如图 6.108 所示。

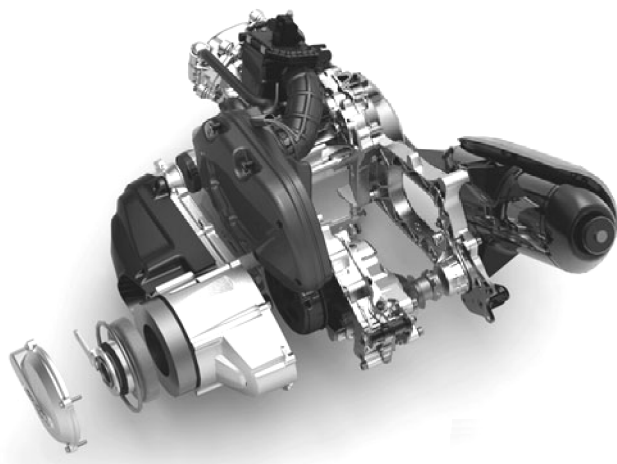


图 6.107 比亚迪 MP3 混合动力的驱动组件

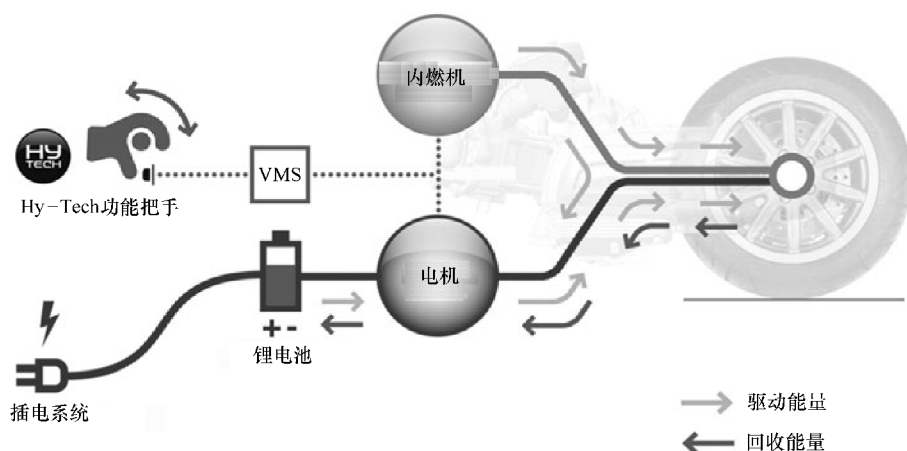


图 6.108 比亚迪 MP3 混合动力的传动链管理系统——VMS

电机在起步时提供动力支持，这在短时间内提供了多达 85% 的转矩和独立的牵引力。在制动和滑行中，电机的发电功能将动能转化为电能并储存于电池中。两个驱动装置的协调不仅能提高驱动功率，还能显著降低油耗。

该混合动力摩托具有一个特殊的选择键，驾驶人可以通过该按键对 4 个运行模式进行选择。4 个运行模式包括 2 个混合动力模式和 2 个纯电动模式（含倒档）。凭借 2 个混合动力模式（最大充电值的充电和混合动力提供最大驱动功率）可以单独影响甚至优化摩托车的性能、油耗和充电策略。在纯电动模式下，该摩托可在 30km/h 的速度下纯电动行驶，此外电动倒档用于停车到位。

锂离子电池、控制装置和充电单元位于座位下方，如图 6.109 所示。电池可以通过电源线连接插座充电（插电式混合动力）。仪表板上的充电指示灯显示其当前的充电状态。



图 6.109 座椅下的电池和充电单元

比亚乔 MP3 混合动力摩托的外观和传统汽油机摩托没有区别，它也具有平行四边形悬架以及两个前轮。跟其他 MP3 车型一样，混合动力版也配备电动液压锁定装置，通过操作按钮可以锁定前轮悬架的倾斜角度，使车身保持直立和稳定，无需双脚触地。停车也无需支架。重要技术参数见表 6.12。

表 6.12 比亚乔 MP3 混合动力摩托技术参数

发动机	124mL 排量（缸径×行程：57×48.6mm）水冷，欧 3 排放，电子喷射，三元催化
混合功率	11.0kW，8500r/min
混合转矩	16.0N·m，3000r/min
电机	持续激励同步电机、三相风冷
额定功率	2.6kW
额定转矩	15N·m
变速器	带离心式离合器的 CVT
能量存储	锂离子电池
电容量	31A·h
消耗/续航里程 (2/3 混合模式，1/3 电驱动模式)	60km/L
CO ₂ 排放量 (2/3 混合模式，1/3 电驱动模式)	40g/km

公交车和货车混合动力技术详解

第7章

目前，混合动力驱动被视作迈向环保型汽车的一个里程碑，其重点在于个人用车。除了个人用车以外，还有其他类型的汽车，如商用车或工程车也使用了混合动力驱动技术。在货车或公交车上采用混合动力与混合动力个人用车的开发，其出发点在原则上是一致的，如第3章“发展混合动力系统的出发点”。值得注意的是在市政、商业和工业用途的车辆具有更佳的性能。适当优化设计的混合动力系统可以被开发，其中许多可以实现更好的效益，以较少的结构优化了交通。通过协调可以对相关混合驱动结构进行改进，更有效地利用混合动力的优势，其结构比个人用车复杂。

该设计的主要参数，如工作周期的长度和特征确定混合动力的比例——公交车一个完整的运行循环中，细到升降气囊的升或降，来确定一个混合度。

- (1) 从微混合动力到全混合动力或插电式混合动力；
- (2) 技术设计为并联式或串联式混合动力；
- (3) 能量储存器可选择动力电池或超级电容，液压或机械系统。

商用车整个模块的安装位置比一般个人用车选择性大，但货车由于环保原因既减少了自重，也减少了有效荷载。

早在20世纪60年代末至70年代初就研发出了混合动力公交车。第一款投入载客使用的混合动力公交车为11m长的奔驰 OE 302，如图7.1所示，型号中的字母“E”表示电力驱动。



图 7.1 梅赛德斯·奔驰 OE 302 - 电动混合公交车（1969 年）

当时城市交通所用的高底盘公交车也为混合动力运用提供了良好的先决条件：在地板下方有足够的空间可以容纳第二个驱动设备以及动力电池。奔驰 OE302 搭载的直流牵引电机的持续功率达 115kW，连续低车速输出功率峰值为 150kW，通过加速踏板进行控制。对当时一辆总重量 16t 的城市公交车而言，这意味着动力的多样化。

牵引电动机配备的动力电池具备 5 个模块及 189 个电极板，整体电压 380V，电容量 91kW·h。采用的“装甲板动力电池”使用寿命为 1500 次充电循环，而每天只需充放电一次。性能及电量可以使车速达到 70km/h，如果按照线路运行每两站之间的距离为 400m 计算，可行驶 55km。

由于电池自重达 3.5t，所以载客量仅为 65 人。

为了实现全天行驶（约 16 小时），奔驰公交车搭载了一台由当时的杜塞尔多夫运输公司生产的型号为 OM314、排量 3.8L 的 4 缸柴油机作为辅助发动机，为了省油和降低噪声，该柴油机的功率限制为 48kW。该动力设备横置于车尾，用于城区外行驶，省油的同时保证转速恒定在最佳综合特性范围内。该公交车搭载电动制动装置，其功能在于联通气动装置而进行制动能回收。

此外，还尝试过采用机械和液压蓄能器。评估的关键在于下列参数如何以及从哪些方面可对传动链进行优化及混合动力化：

- 1) 当前常规系统的效率；
- 2) 成本结构（分为：投资、人工、运营和维护成本）；
- 3) 混合动力系统的必要性能；
- 4) 有效载重要求；
- 5) 每年行驶里程；
- 6) 行驶特征（动态、静态、路段拓扑结构等）。

考虑到不同车辆类别，可以推断其配置上有很大的不同，因此混合动力化只是根据具体情况适用，而且必须在每种情况下准确地调整，以符合主要应用的要求。图 7.2 显示了混合动力化对哪种车辆类别更为适用。车辆允许的整体重量在 7.5 ~ 16t 的轻型货车用于送货，因此表明在市内行驶过程中起停频繁。符合上述应用的技术是中度和动力辅助式混合动力技术。采用更大程度的电气化来利用制动能，将导致能量储存系统成本大幅度上升。由于大部分时间内匀速行驶及其高驱动效率，因此在长途货车上装配混合动力系统的可能性不大，改进需要耗费过多的成本。但是根据现有的技术解决方案，在未来将出现越来越多的电力辅助系统，如：固定式空调和车载电源，以克服目前还在休息时间使用的、效率低、噪声大的怠速空转的缺点。

类似的还有公交车，由于频繁起停（2 ~ 3 次/km），静止状态比例大（20% ~ 45%）频繁处于部分负荷运行状态和运行时间相对较长（通常可达 16h/天），且市区内排放控制严格，所以城市公交车再度体现出配备全混合动力系统动力总成的必然性。相比之下，在长途旅游汽车电气化如配备固定式空调和车载电源更适用。根据车型和应用特点，特种车辆范围较广，除了常规动力驱动以外，采用中度至全混合动力皆有可能。

特别是在高度拥挤的城市交通中应尝试尽可能地减少有害物质的排放或部分实现零排



图 7.2 不同车辆级别的传动链优化措施

放。公共交通的运营商经常扮演先驱的角色，他们不断地增加非常规动力、降低排放驱动技术车辆的比例。

公交车必须适应不同的运营路段，各个路段上的行驶特征、交通流量、乘客数量以及在某些情况下还有运营线路的高度特征也有所不同。如果可以根据每个应用特点对混合动力系统进行优化，就可以达到最佳的驱动效果。在此有一个折中的方案，尽可能研发一类成本较低的模块化组件。

理论思考和实际应用表明，城市公交车采用混合动力驱动在省油方面的发展潜力巨大。成功的关键是在各个行驶循环中实现智能运行策略。

串联式混合动力驱动，除了发动机和电机之间纯机械式去耦以外，还可以采用小型化技术进行优化。优点在于除了负荷点移动，明显减轻发动机重量，及因为电驱动而免除复杂的自动变速器，减少的重量可以用在增加的储能系统上。串联式混合动力具有轮毂电机即电动轴，图 7.3 所示为 ZF 公司的 AVE130 公交车，具有紧凑的尺寸，对于低地板的标准轴来说，电机的安装必须与混合驱动轴的安装空间相适应，通过标准城市公交车采用无地板小车的方式匹配，如此一来，该技术可以避免自动底盘的高额改造。

该技术中，通过两级式传动的高速异步电机进行驱动。由于传动比固定，无换挡过程出现，可用于前轴和后轴驱动的短时间最大功率为 240kW 和连续输出最大输入功率为 120kW。

除串联式混合动力驱动系统以外，公交车也可选择采用并联式混合动力技术。福伊特驱动技术公司已经开发出并联式混合动力方案，即通过异步电动机辅助，以差速器-液力变矩器为基础并结合迪瓦混合动力（DIWA hybrid）的并联式混合动力，如图 7.4 所示。该并联式混合动力采用迪瓦的已知优势，如在起步时的功率分配（将输入功率分别转换成机械和液力部分）、次级液力制动器和安装阿拉丁（ALADIN）诊断软件的电子控制单元 E300。该系统连接了损耗较低的异步电机，该电机在车辆启动和加速时对柴油机进行支持。在制动过程中，该电机作为发电机工作，并作为一个初级缓速器，为迪瓦的次级液力缓速器提供理想

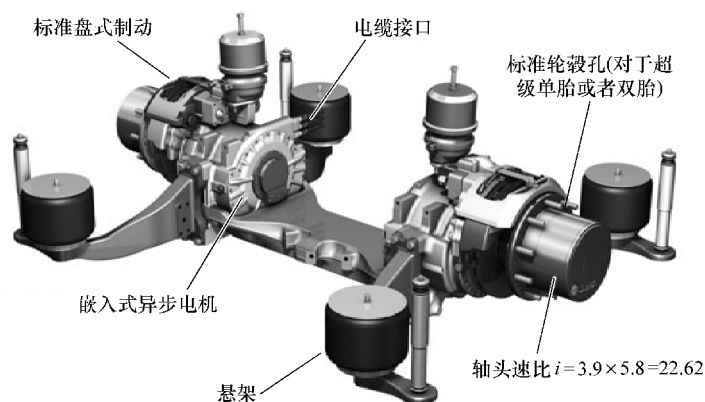


图 7.3 城市公交车车轴 AVE130 (采埃孚公司)

的减速支持。主制动器因此而负担减轻，制动器的磨损减少并将由此产生的微粒污染降到最低。该并联式混合动力的优势在于它的普遍适用性，尤其是平均速度较快的车辆。美国巴士生产商 Gillig 已经完成展出的样车及其测试。

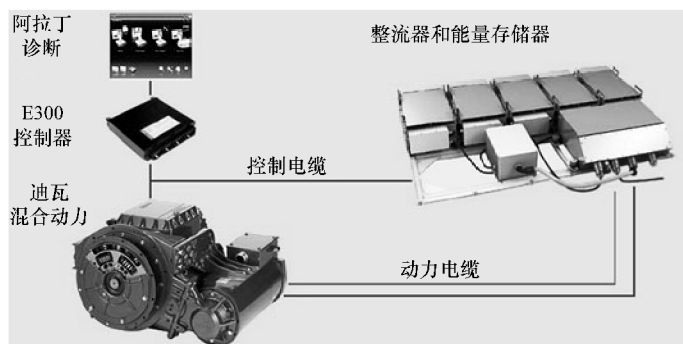


图 7.4 差速器-液力变矩器相结合的并联式混合动力
(迪瓦混合动力, Voith Turbo 公司)

采埃孚 (ZF) 开发出一款模块式紧凑型混合动力变速器“eTronic”作为并联式混合动力系统，特别适用于重量在 6.5t 以内的轻型商用车，如图 7.5 所示。在机电混合动力变速器的动力总成上集成一台 41kW 的电机，使该系统适用于中度和全混合动力。一个分离离合器可以使该电机及其变速器和发动机之间完全去耦，可以使用各种混合动力功能，甚至使用电动行驶。混合动力变速器作为发电机工作时也可作为电源。

另一种并联式混合动力解决方案是采埃孚 DynaStart 模块，如图 7.6 所示。该起动机/发电机电机为商用车提供高达 120kW 的功率和 1000N·m 的辅助转矩。采埃孚 DynaStart 还提供包括分离离合器在内的一体式的模块，由此可以实现纯电动行驶。

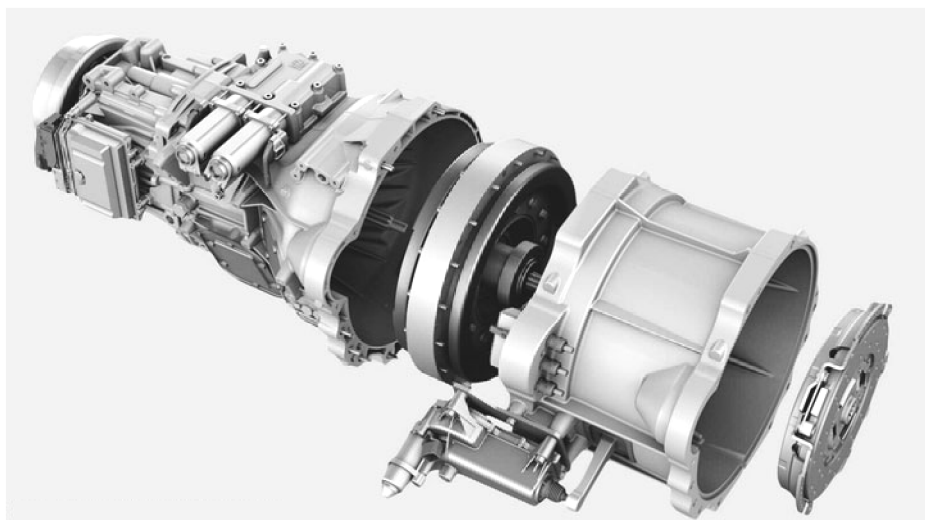


图 7.5 采埃孚公司的 eTronic 混合动力变速器（带有 41kW 电机）



图 7.6 采埃孚 DynaStart（右图带有分离离合器）

以下是混合动力应用于公交车、货车和特殊车辆方面的具体案例。

7.1 混合动力公交车

7.1.1 Orion 7 代 HybriDrive 公交车

北美混合动力公交车的普及早于欧洲。1996 年，奔驰旗下的客车生产商 Orion 开始生产公交车。从那时起，每天有 2200 辆 Orion 公交车在运营。如图 7.7 所示，Orion 7 代 HybriDrive 公交车由 Orion 公司和美国合作伙伴 BAE 系统公司共同开发。

Orion 7 代 HybriDrive 公交车搭载串联式混合动力总成，其中柴油机一直保持工作状态。该公交车配备 6 缸 6L 康明斯柴油机及炭烟微粒过滤器，该功率为 194kW 的柴油机横向位于车尾，技术参数见表 7.1。一台功率为 120kW 的发电机为动力电池进行充电及驱动功率为

186kW 的电动机，该电动机也用于回收制动能。该油冷式电动机短时间的功率峰值甚至可达 235kW。Orion 7 代公交车的上述结构可以弃用变速器。最初设计采用的是 $32\text{kW} \cdot \text{h}$ 的铅酸电池，安装于公交车顶篷中，共 46 个模块分为左右各一半，整体重量为 1.8t，后被锂离子动力电池取代，如图 7-8 所示。Orion 7 代公交车不配备充电插头，电池充电的电能来源于制动能回收以及柴油机工作。



图 7.7 Orion 7 代混合动力公交车

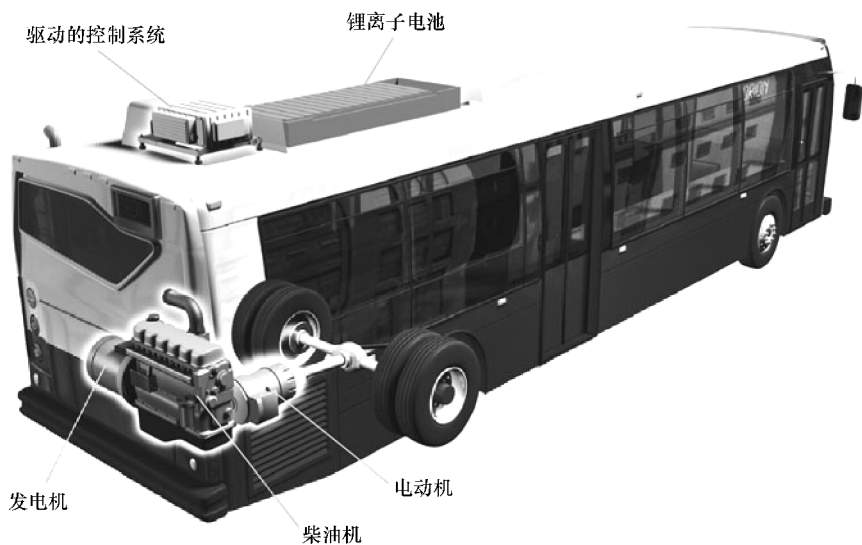


图 7.8 Orion 7 代混合动力公交车的现有混合驱动链

Orion 7 代公交车比柴油机驱动的同档车辆省油 20% ~ 25%。

表 7.1 Orion 7 代混合动力公交车的技术参数

产地	美国/加拿大
类型	城市公交车
驱动	串联混合动力，柴电化
发动机	6 缸，直列
燃料	柴油
气缸容积	5.900L
额定功率	194kW 当 2300r/min 时
电驱动	电动机功率 186kW，发电机功率 120kW，铅酸电池容量 32kW·h
排放标准	EPA04 标准
量产制造	从 2002 年

7.1.2 三菱扶桑 Aero 公交车

低地板三菱扶桑 Aero 公交车由奔驰的日本子公司三菱扶桑客货车公司（MFTBC）开发，并在 3 个日本城市投入公交系统运营。其串联式驱动装置的结构类似于北美 Orion：一台功率为 177kW 的柴油机横置于车尾，并在最佳综合特性范围内驱动发电机。两台电动机用于驱动车辆的总功率为 134kW，其转矩通过叠加齿轮传递。该系统还采用常规门式轴。介于该公交车的低地板结构，动力电池同样位于顶篷，采用的锂离子电池重 323kg。扶桑公交车的最低油耗比纯柴油动力的公交车低 30%。

2007 年 9 月底三菱扶桑推出了第二代混合动力公交车，命名为 Aero Star Eco，如图 7.9 所示。当时全新的驱动技术以排量 4.9L 的四缸柴油机为基础。该柴油机功率为 132kW 且只用于发电。两台电机的输出功率均仅为 79kW。在遇到红灯和车站停车时，柴油机自动停止工作，车门以及辅助装置因此纯电动工作。车辆起动也是电力驱动，柴油机在中等速度时起动发电。



图 7.9 低地板扶桑 Aero Star Eco Hybrid 公交车

低地板扶桑 Aero Star Eco 混合动力公交车的技术参数见表 7.2。

表 7.2 低地板扶桑 Aero Star Eco 混合动力公交车的技术参数

产地	日本
类型	城市公交
驱动	串联混合动力，柴电技术
发动机	4 缸，直列
燃料	柴油
气缸容积	4.899L
额定功率	132kW，当 2700r/min 时
电驱动	2 台中央电机，功率 $2 \times 79\text{kW}$ ，发电机功率 40kW，锂离子电池，电池容量 $13.95\text{kW} \cdot \text{h}$
排放标准	JP05 标准
量产制造	从 2007 年开始

7.1.3 奔驰 Citaro G BlueTec 混合动力公交车

欧洲市场的公交车生产商 Citaro 于 2007 年开发出一个混合动力公交车样车，并于 2009 年开始小规模量产，如图 7.10 所示。



图 7.10 梅赛德斯·奔驰 Citaro G BlueTec 混合动力公交车

奔驰 Citaro G BlueTec 是一款配备了轮毂电机的串联式混合动力公交车，实现了部分路段零排放的电动行驶。该混合动力公交车可以在车站、静止和起动加速时由电力驱动。搭载的柴油机与驱动轴之间没有机械连接，并根据需要驱动发电机发电。辅助装置，如转向助力泵、空气压缩机、车门控制装置和空调设施都由电力驱动。

柴油机工作产生的电能储存到容量 $19.4\text{kW} \cdot \text{h}$ 且无需维护的锂离子电池中，电池系统

为功率为 180kW，重量相对较轻，不到 350kg。该动力电池同样可以储存回收的制动能。650V 高电压中间电路确保对发电机、电池和轮毂电机的支持。

实际驱动 Citaro 混合动力公交车车轮是 4 台轮毂电机，为中间轴和后轴各提供 80kW 的峰值功率或 60kW 的持续输出功率。

小型化（减少尺寸）技术会产生较大的省油优势。在该技术下，排量 4.8L、160kW 的 4 缸柴油机代替了排量 12L 的 6 缸直列式发动机，用来驱动一台功率相应为 160kW 的发电机，见表 7.3。仅柴油机就从原来的近 1000kg 减到约 450kg。此外，在负荷点位移和接近发动机最佳工况时，该发动机可作为纯发电机驱动在一个狭窄的转速范围内运行。因此，该混合动力公交车驱动装置的转矩特性曲线所显示的低排放和低油耗优化主要体现静止工况下。

表 7.3 梅赛德斯·奔驰 Citaro G BlueTec 混合动力铰接式公交车的技术参数

产地	德国
类型	铰接式城市公交
驱动	串联混合动力、柴电化
发动机	4 缸，直列，OM 924 发动机
燃料	柴油
气缸容积	4.800L
额定功率	160kW 当 3200r/min
电驱动	四台异步轮毂电机（在中间轴和后轴），功率为 4 × 80kW，发电机功率 170kW。锂电池、电池容量 19.4kW · h
排放标准	欧 4 标准
量产制造	样车，小批量从 2009 年开始

Citaro G BlueTec 混合动力公交车与常规柴油驱动的铰接式公交车相比，所增加的重量约 1t，由于该公交车采用电驱动，所以可以省去常规的自动变速器。轻量化的柴油机安装在车尾，动力电池安装在第二车桥正上方的顶篷内，由此体现出该铰接式公交车在重量分配上的优势。

奔驰 Citaro FuelCELL 混合动力公交车以 Citaro G BlueTec 混合动力为基础，两块安装在顶篷中的燃料电池堆用来发电。它们产生的电力为 120kW 的电机提供持续输出功率。每个电池堆包含 396 个单独的燃料电池单元。其效率为 51% ~ 58%。轮毂电机、换流器和动力电池也沿用 Citaro G BlueTec 混合动力的技术。除了燃料电池堆、压缩气体容器及 35kg 的压缩氢气，锂离子动力电池以及车内空调装置都位于车辆顶篷中。样车的燃料消耗为每行驶 100km 消耗 11 ~ 13kg 的压缩氢气。

7.1.4 曼混合动力公交车

曼公司的概念车 IDEAS 1 和 IDEAS 2（IDEAS 是“创新柴电混合动力城市公交车”的缩略语）采用两种不同的策略，都属于串联式混合动力驱动系统。IDEAS 1 的开发理念是最大限度省油，并于 2007 年投入试运行。使用超级电容器作为蓄能器可以达到高电功率，但能量存储量不大，如图 7.11 所示。该双层超级电容被安装在车辆顶篷。柴油机具有 191kW 的功率，通过法兰与驱动永磁同步发电机（150kW）适配。发电机或双层超级电容为两台通过叠加齿轮相连的功率各 75kW 的异步电机供电。转矩经由万向节轴传递到后轴。驱动系统的体系结构如图 7.12 所示。

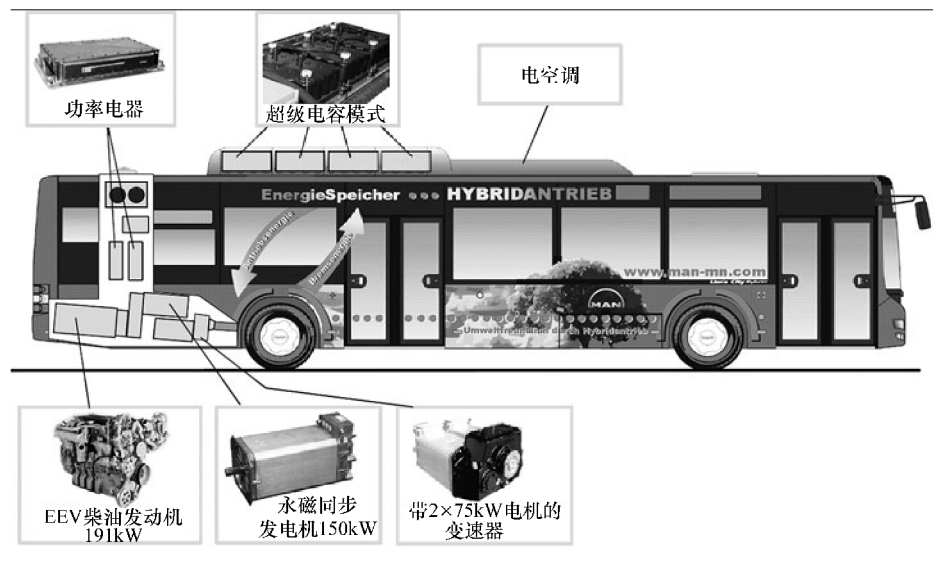


图 7.11 曼公司的 IDEAS1 公交车（能耗优化型）

电容器通过直流中间电路进行电力连接。由此，可以对直流中间电路中的电能吸收和释放进行限制性控制，然后由升降压单元对电压进行调整，参见图 7.12。

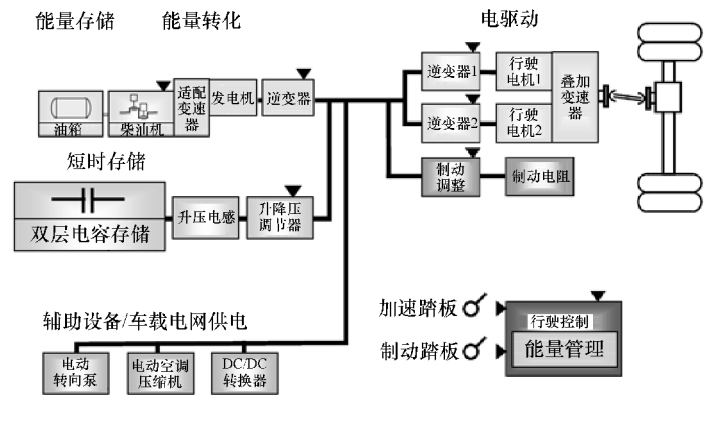


图 7.12 驱动系统的简图（带有超级电容）

柴电驱动以及蓄电装置的组合可以使柴油机的功率、转速与车辆行驶状态无关。在制动过程中，车辆的一部分动能可以暂存在蓄电装置中的，并用于加速。根据蓄电装置的充电状态、柴油机所需功率和温度，柴油机在车辆静止时关闭。纯电动行驶后，柴油机通过起动机起动。起动过程取决于驾驶人期望的性能、车辆的速度和蓄电装置的充电状态。辅助单元的电动去耦可以根据需求对上述功能进行优化控制。纯电动续航里程被限制在 100m 范围内。采用该驱动系统的纽伦堡 36 路公交车比常规公交车省油 30%。

IDEAS 2 采用了另一个方案，该公交车可以短距离纯电动行驶，从而实现部分路段零排放，如图 7.13 所示。因此采用具有更高电容的动力电池来代替电容器，这种变化增大了柴油机小型化的可能性。

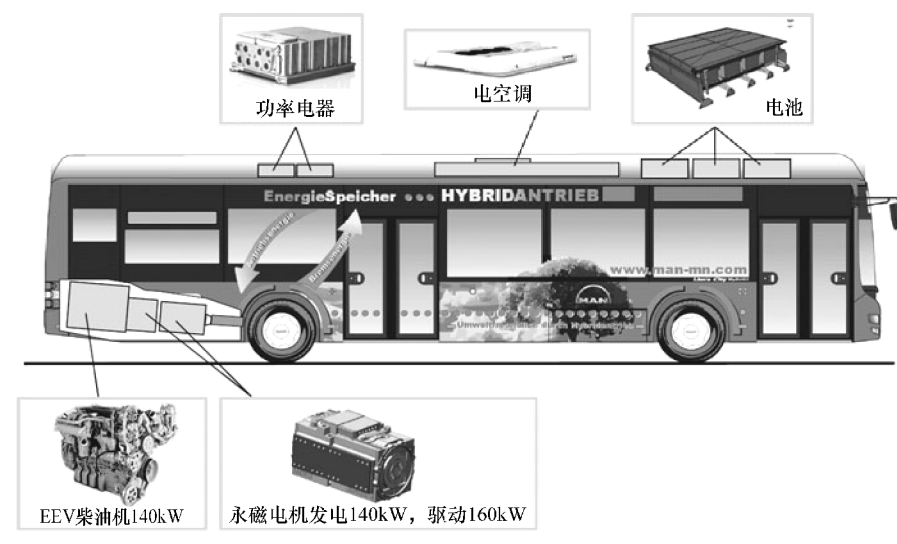


图 7.13 曼公司的 IDEAS 2 公交车（局部零排放型）

在 2009 年举办的 UITP 国际公共交通展览会上，曼公司首次展出了量产版 Lion's City 混合动力城市公交车，如图 7.14 所示。



图 7.14 曼 Lion's City 混合动力公交车

该公交车以 IDEAS 1 公交车技术为基础，采用串联式混合动力技术和超级电容作为蓄电装置。一台额定功率为 184kW 的 EEV 型广泛量产的排量 6.9L 曼 PURE DIESEL[®] D0836 - 6 缸柴油机和电控 CRTec[®] 炭烟微粒过滤系统驱动一台大功率发电机，进而为两台电动机提供电能。该柴油机始终保持最佳转速。图 7.15 所示为其混合动力结构。

每台额定功率为 75kW 的两台高转速异步牵引电动机通过叠加变速器驱动标准的低地板



图 7.15 曼 Lion's City 混合动力公交车的混合动力组件

门式车轴，由此达到 $3000\text{N} \cdot \text{m}$ 的最大转矩。传动链的架构类似于 IDEAS 1 混合动力公交车，见图 7.12。一款自主开发的能量管理系统 i-MEM（MAN 智能能量管理）对动力总成上各个部件进行控制。属于该系统控制范围内的还包括两个车载电网，即常规的 24V 电网以及混合动力技术配备的高压电网。电动辅助设备包括空调压缩机、空调系统以及转向助力泵。

电能存储系统由 12 块高性能电容（超级电容）组成，位于前车厢顶篷，如图 7.16 所示。该超级电容可回收高达 150kW 的制动功率。当超级电容完成充电，制动阻力所产生

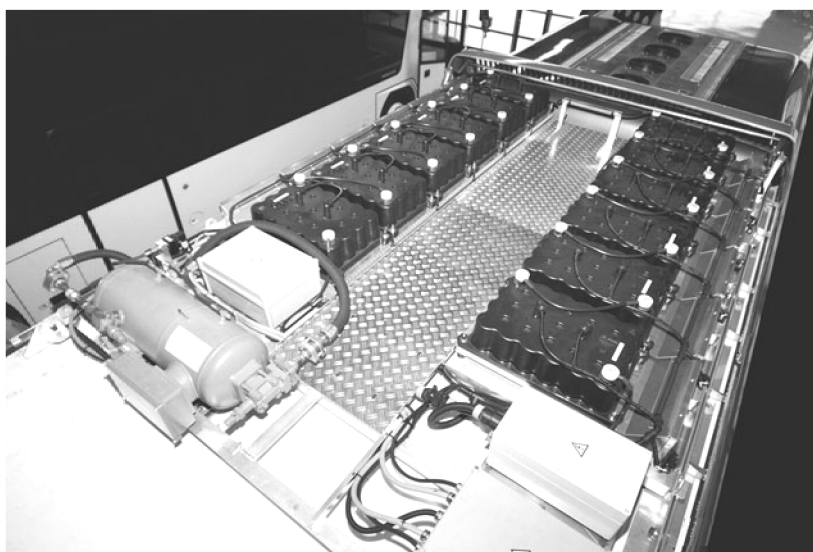


图 7.16 曼 Lion's City 混合动力公交车顶上 12 块风冷式超级电容

的能量将转换成热能。超级电容的特点是低内阻，因此蓄电效率高。相对于动力电池，超级电容的另一个优势是使用寿命长，该优势主要是针对基础车型而言。此外，超级电容的风冷系统安装在车辆顶篷中。

曼 Lion's City 混合动力公交车的技术参数见表 7.4。

表 7.4 曼 Lion's City 混合动力公交车技术参数

柴油机	曼 DURE 柴油机，直列六缸，曼 D0836 LOH，塔式安装，双级涡轮增压带中间冷却，高压共轨直喷，4 气门技术，排放根据 EEV 具有 CR Tec – 微粒过滤系统
气缸容积	6.871L
额定功率	184kW 当 2300r/min 时
最大转矩	1050N·m 当 1200 ~ 1750r/min 时
发电机	永磁同步发电机，145kW 输出功率
驱动电机	2 台西门子异步电机每台 75kW（额定功率），通过共用变速器作用于后轴，最大转矩在万向节上总计 3000N·m
蓄电系统	12 个空气冷却的超级电容，每个电容有 24 块极板，蓄能为 0.4kW·h，最大充/放电功率 200kW，额定电压范围从 400 ~ 630V
逆变器	IGBT 技术水冷脉冲逆变器
特殊辅助设备	电动助力转向泵，DC/DC 全车电路充电转换器（水冷），电子空压机和空调设备
能量管理	i – MEM（曼智能化能源管理），曼自有的整体电机电流优化系统（行驶和辅助设备）
尺寸、重量	11 950 × 2500 × 3280mm，约 12 600kg（自重），18 000kg（总重）
座位/站位数	26 + 1/48

7.1.5 Hess 双铰接混合动力公交车

Hess 双铰接混合动力公交车也跟曼 IDEAS 1 具有类似的混合动力系统以及超级电容，如图 7.17 所示。该量产化的混合动力公交车搭载柴油机发电机一体化单元，其作用在于发电，为驱动提供所需的电力支持，其中一部分电能储存在位于车辆顶篷的超级电容中，回收的制动能也储存在其中。功率各为 160kW 的两台驱动电机位于样车的第二和第三轴，在制动的时候也作为发电机工作。测试车辆的柴油机的设计为起/停自动控制。因此，到站和出站时该公交车的柴油机可以停止工作。

表 7.5 为 Hess 双铰接混合动力公交样车的技术参数。

7.1.6 沃尔沃 7700 并联式混合动力公交车

区别于混合动力公交车采用串联式技术的整体趋势，沃尔沃开发出一款采用 I – SAM 并联式混合动力技术的公交车——沃尔沃 7700。所搭载的永磁同步电机既可作为发电机也可作为电动机（70kW 的连续输出功率，120kW 的峰值功率）工作，见图 7.18 和图 7.19 。该

电机位于达到 EEV 排放标准的 4.8L 柴油机和 I – Shift 自动变速器前的离合器之间。



图 7.17 配备超级电容的 Hess 双铰接混合动力公交车

表 7.5 Hess 双铰接混合动力公交样车技术参数

巴士	Hess 轻型电车混合动力/2I – 2S – 2S – 2S
驱动	在 2 和 3 轴上电驱动
发动机品牌和类型	斯堪尼亚 DC9 型带发电机和超级电容
建造年份	2007
气缸数量	5
喷射	电子控制
功率	228kW 当 1900r/min 时
转矩	1550N · m 当 1100 ~ 1300r/min 时
气缸容积	9L
废气净化	无车用尿素的 EGR（废气再循环系统）（欧 4）
制动系统	气动，弹簧和到站停车制动
制动器	各轴盘式制动
弹簧悬架	气动 ELC（电子水平控制）
轴	前轴及后轴为硬轴，驱动轴（2 和 3 轴）为主轴
轮胎/轮毂	前轴 305/70 R22.5/8.25 × 22.5 驱动轴（中间 2 和 3 轴）275/70 R22.5/7.5 × 22.5 后轴 385 × 55 R22.5 11.75 × 22.5
变速比	$i = 9.81$ 驱动轴（2 + 3）
电池	2 个凝胶电池

离合器的断开或闭合使两台发动机可以独立或一起工作。由此形成的转矩曲线以及样车见图 7.20。行驶速度大致在 20km/h 以下是采用电力驱动。在更高的速度下，由柴油机（4.8L、158kW、800N · m）进行驱动，同时为位于车辆顶篷的电容量为 4.8kW · h、重

200kg 的锂离子动力电池充电。所配备的辅助设备均为电动设备，所以该公交车可以在离站时采用纯电动模式驱动。该公交车的技术参数见表 7.6。

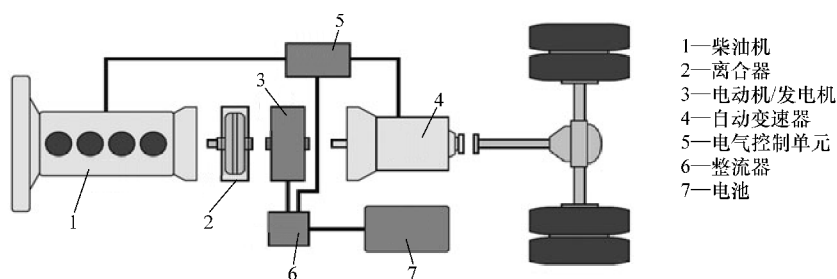


图 7.18 沃尔沃 I-SAM 7700 并联式混合动力系统

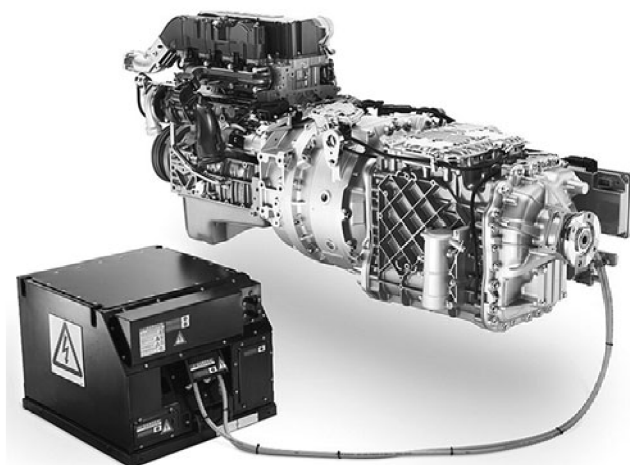


图 7.19 配备锂离子电池的沃尔沃 I-SAM 7700 并联式混合动力公交车传动链

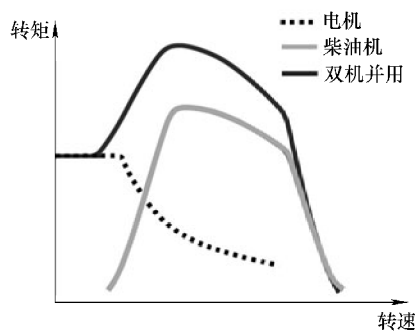


图 7.20 沃尔沃 I-SAM 7700 并联式混合动力公交车的转矩变化

表 7.6 沃尔沃 7700 混合动力公交车的技术参数

产地	瑞典
类型	城市客车
驱动	并联式混合动力
发动机	4 缸，直列，沃尔沃 MD5、高压共轨电喷，排放级别 EEV
燃料	柴油
气缸容积	4.760L
额定功率	158kW 当 2200r/min 时
最大转矩	800N·m 当 1200~1700r/min 时
电驱动	永磁式电机，最大功率 120kW，持续功率 90kW，最大转矩 800N·m，持续转矩 400N·m 锂离子电池，电压 600V，电池容量 4.8kW·h
动力传递	全自动 12 档变速器，沃尔沃 I-Shift，速比 14.94~1.0，门式后轴 ZF 速比 4.72
尺寸、运载能力	长/宽/高：12.074/2.550/3.207m 轮距：5.945m 油箱体积：220L+35L 车用尿素 乘客数：95

7.1.7 依维柯 Irisbus Hynovis 混合动力公交车

在现代化的城市公交车的基础上研发的概念车——Hynovis 归类于并联式混合动力公交车，见图 7.21。Hynovis 采用的是与波克兰公司（Poclain）共同开发的液压式混合动力驱动技术。



图 7.21 依维柯 Irisbus Hynovis 混合动力公交车

Hynovis 具有两套液压系统：一套用于起/停功能的系统（在车辆启动之前 0.3s 启动）；另一套是液压联机泵，用于回收制动能，所存储的能量可用来再次加速。

该驱动系统以一台符合 EEV 排放标准的 162kW 的依维柯 Tector6 缸发动机为基础。采用福伊特 6 速自动变速器进行传动。一体化的驱动单元安装在车尾。在发动机不工作时，动力电池和超级电容组成的混合蓄电系统为辅助系统提供电力支持。该公交车的另一个特征为三轴车辆、全轮转向。

与 12m 长的常规公交车相比，依维柯 Irisbus Hynovis 混合动力公交车除了创新的结构设计外，还缩小了柴油机气缸体积，从而在载客能力增加 8%（共计 9 人）的基础上，总重量反而减轻了 1t。由于重量减轻，车辆的滚动阻力减小，加之采用混合动力驱动，总共可省油约 30%。

7.1.8 Solaris Urbino 18 混合动力公交车

Solaris Urbino 18 混合动力公交车搭载由美国通用汽车旗下 Allison Transmission 公司生产的功率分配式混合动力驱动系统，如图 7.22 所示。该系统已经成功地应用于美国 1000 多辆公交车上。

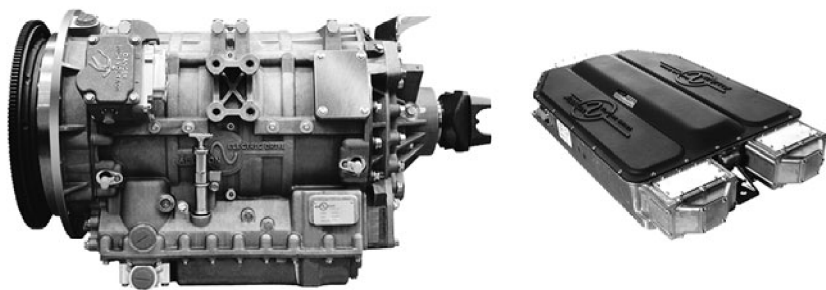


图 7.22 功率分配驱动，混合动力 EV50Drive TM 双向电力变换模块（GM - 爱里逊公司）

该车辆通过功率 250PS、排量 6.7L 的康明斯 ISBe5 - 250B 柴油机和 Allison Transmission 公司的 EP50SystemTM 混合动力变速系统进行驱动。该混合动力驱动系统由 2 台电动机、2 个同步离合器和 3 个行星齿轮组构成。其结构相对应章节 2.3 中图 2.18 所示的系统。在本书 2.3 节中已经介绍过，通过离合器可以实现两个不同齿轮组的变速比变化。在这两个范围内，可以通过电气分支实现较低电功率，见图 2.19。2 台发动机由两台分别重 75kg 的油冷式双换流器模块（DUAL POWER INVERTER MODULE, DPIM）进行支持。该车辆使用镍氢电池存储电能。整个动力电池模块具有 600V 的额定电压，电容量为 19A · h。其重量为 420kg，与双向电力变换模块一起位于该车顶篷前端，见图 7.23。混合动力驱动系统位于车厢尾部左侧发动机舱内。车辆通过第三轴驱动。

7.1.9 斯堪尼亚混合动力概念公交车

斯堪尼亚混合动力概念公交车的特点在于其模块化设计。该车辆由后置驱动模块、乘客模块、仪表盘模块和顶篷模块构成，如图 7.24 所示。其他特殊性能还包括可转向后轴和低悬架，这些特点共同构成良好的操控性。



图 7.23 Solaris Urbino 18 混合动力公交车（第一代 2006—2007 年）

后置驱动模块可以配备各种发动机，从而可以使用柴油、乙醇汽油或天然气作为燃料。该公交车采用串联式混合动力技术，见图 7.25。发动机的位置与车行方向垂直并配备特殊降噪外壳。该驱动系统的其他部件包括发电机、电力电子装置、高压电阻、超级电容（作为蓄电装置）与适用于 24V 车载电网的 DC/DC 转换器以及电动机。辅助设备如冷却剂泵或空调用电驱动，因此发动机上可以无需传动带。



图 7.24 斯堪尼亚混合动力公交车的模块方案

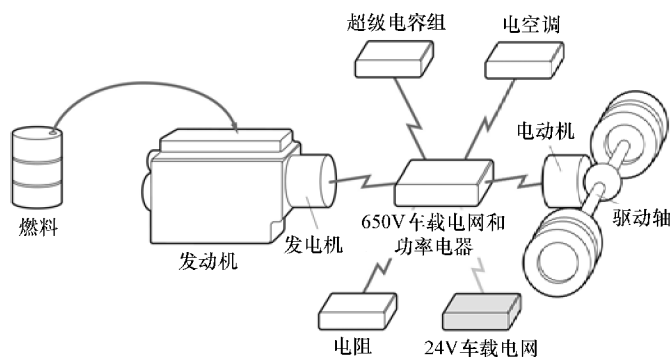


图 7.25 斯堪尼亚混合动力公交车串联式传动链

电阻器集成在发动机的冷却系统中，其功能类似于常规传动链中的缓速器。如果电池已充满电，通过该电阻器回收制动动能转换成热能。该装置在长距离的下坡路段是必不可少的。此外，该装置还可用于车辆快速加热，并且在低温条件下对供暖功能进行支持。

电力驱动是采用福伊特公司 Elvo Drive 系统，如图 7.26 所示。发电机和电动机均为横向磁通永磁电机，请参见本书 4.2.8 横向磁通电机。这些电机在低转速时已经显示出较高的效率，并具有高功率密度。驱动电机的最大转矩为 $2750\text{N} \cdot \text{m}$ ，并直接与差速器法兰连接，无需变速比。

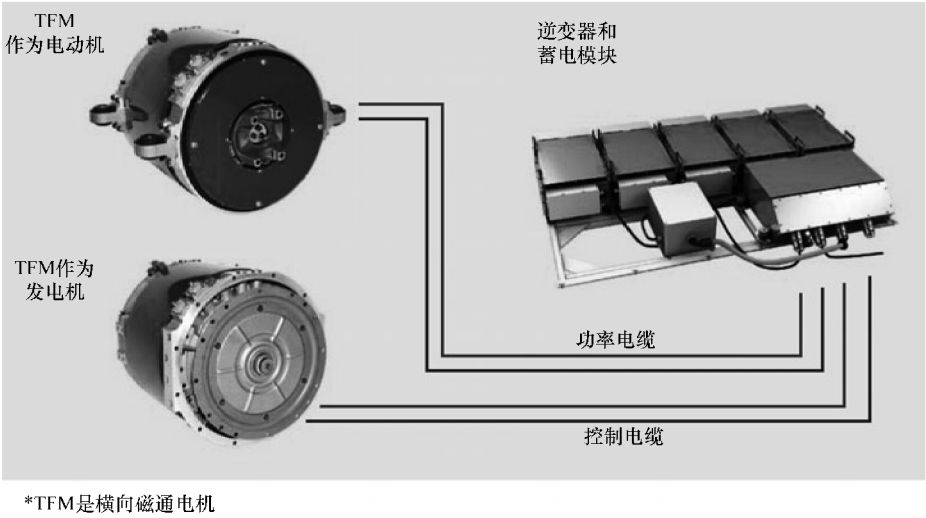


图 7.26 Voith Turbo 公司的 Elvo Drive 系统

作为蓄电和最佳的制动能量回收装置，超级电容安装在车顶模块内。该蓄电模块重 200kg，以存储满载公交车所回收的制动能或加速到 50km/h 过程中产生的电能。此外，该蓄电模块可以为发动机起/停提供电力支持。

车顶模块具有双层结构，具有风冷通风系统和电驱动的空调系统。如果搭载燃气发动机，该模型与气体发动机、气瓶位于车顶模块中。

发动机具有的运行自由度可显著降低油耗。发电机的效率范围在 90% 以上，其中峰值高达 94%，且发动机在效率 40% ~ 45% 的负荷点运行。由此可得，发动机 - 发电机模块的整体效率为 35% ~ 42%。牵引电机的效率尤其是在低转速范围内与发电机的参数值类似。相对于常规动力公交车，通过自由选择最佳发动机工作范围和能量再生时机，该公交车比常规车辆省油 25% 以上。

斯堪尼亚混合动力概念公交车的技术参数见表 7.7。

表 7.7 斯堪尼亚混合动力概念公交车的技术参数

发动机	斯堪尼亚 9L 柴油机或乙醇发动机或燃气发动机
功率	198kW 当 1800r/min 时
转矩	1250N · m 当 1100 ~ 1450r/min 时
发电机	Voith 公司 EVL Driver，横向磁通电机，水冷

(续)

发电机转矩	1250N · m
功率	220kW
最大转速	2400r/min
驱动电机	Voith 公司 EVLO Drive，横向磁通电机，水冷
最大转矩	2750N · m
持续转矩	1800N · m
持续功率	150kW
最大转速	2400r/min
能量储存	超级电容，4 × 125V 马克斯韦尔 BOOST – CAP，风冷
电容量	>400W · h

7.2 混合动力货车

7.2.1 奔驰斯宾特（Sprinter）插电式混合动力多用途货车

作为商用车，插电式混合动力汽车具有特殊的意义，因为该类车辆可以每次交班之后在站点通过插座充电，电池从完全没电到充满的标准充电时间为 6 ~ 8h。例如，车辆在城市的商业用途下在 30km 范围采用纯电动模式，使减排和重量处于一个良好的平衡点。因此，奔驰斯宾特插电式混合动力多用途货车（样车）的零排放行驶距离可达 30km。图 7.27 所示为第二代奔驰斯宾特插电式混合动力多用途货车。



图 7.27 梅赛德斯·奔驰斯宾特插电式混合动力多用途货车

新的奔驰斯宾特插电式混合动力多用途货车采用并联式混合动力技术，正如该车的仪表板上的显示器所示，其混合动力部分的电机位于发动机和变速器之间，如图 7.28 所示。锂

离子电池作为该车的动力电池，其存储密度大大高于镍氢电池，因此其有效载重略低于搭载常规柴油机的斯宾特多用途货车。新电池技术的另一个同样重要的优势在于，锂离子电池需要的空间少很多，对载货空间几乎没有影响。

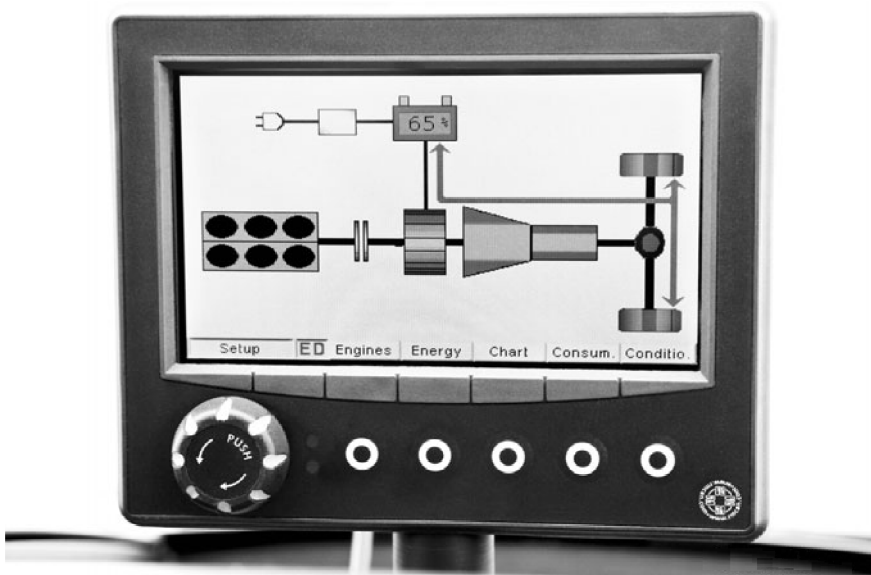


图 7.28 梅赛德斯·奔驰斯宾特插电式混合动力多用途货车的内舱显示器（含有能量流和电池充电显示）

动力总成各个部件之间的协调通过一个智能运行策略进行调节。在遇到红绿灯停车时，发动机关闭，采用纯电动起动，急加速时，发动机同时工作。在车辆匀速行驶过程中，发动机运行取决于功率要求，发动机在制动过程中关闭，电动机作为发电机为电池充电。由于该插电式斯宾特可以纯电动行驶，其助力转向泵、制动助力器和空调压缩机必须由电力驱动，参见本书 4.5 节“辅助装置”。

从结构来看，该并联式混合动力各个部件的排列从前到后依次为发动机、液压离合器、电机以及一个 5 速自动变速装置。发动机作为辅助动力装置，在需要的时候进行工作，具有适合短途运输的显著优势。发动机由电机起动，因此常规起动机可以省略。另外，先前使用的发电机也是多余的。辅助单元采用电驱动使用并允许纯电动行驶。仅重 173kg 的锂离子电池组位于紧接后轴的货舱之下。

该锂离子电池由 104 块电极板串联而成。额定电压 374V，电池容量 41A·h，电容量 14.4kW·h。电池管理系统监控每块电极板的电压和温度。转换器将动力电池 250 ~ 450V 的电压转换成适用于电机的三相交流电压。电机最大功率为 75kW（连续输出功率为 50kW），且最大转矩 325N·m（连续输出转矩为 175N·m），几乎可满足所有常见的功率要求。重要的是该电池仅重 52kg。两个额外的冷却回路控制电驱动装置所有组件的温度。

驾驶人通过仪表板上的行驶模式切换装置选择“混合动力”和纯电力驱动“零排放”模式。在“零排放”模式下，斯宾特插电式混合动力商用车进行纯电动行驶，直至电池充电状态不足以支持纯电动行驶。在动力电池电量低于 25% 时，该车搭载的汽油机自动起动。该功能同样适用于在速度高于 65km/h 的情况下，当功率需求超过了电机或加速踏板踩下

90% 停留 0.5s 以上时。

奔驰斯宾特插电式混合动力多用途货车的技术参数见表 7.8。

表 7.8 梅赛德斯·奔驰斯宾特插电式混合动力技术参数

产地	德国
类型	多用途货车，自重 2.66t
驱动	并联式混合动力驱动、插电式，油电技术
发动机	V6 发动机（M272）
燃料	汽油
气缸容积	3.498L
额定功率	190kW 当 5900r/min 时
最大转矩	340N·m 当 2500~5000r/min 时
变速器	自动变速器 W5A380，速比 3.6~0.83
轴速比	4.36
电驱动	永磁式同步电机
持续转矩/峰值	172N·m/325N·m
持续功率/峰值	50kW/75kW
重量	52kg
电池	锂离子电池（SAFT）104 块极板 额定电压 374V，容量 41A·h 蓄能为 14.4kW·h，重量 173kg
节能减排能力	10%~50%（根据实际使用），新欧洲行驶循环；20%
电力续航（新欧洲行驶循环工况）	约 30km
有效载重	1.2t
0~100km/h 加速时间	约 22s
市场	美国
排放标准	EPA

7.2.2 曼轻型货车

2005 年，曼公司根据轻型货车的常规动力总成开发出一个以典型运行条件为基础的优化动力总成技术，并生产出样车。整个驱动技术的线路图见图 7.29，样车见图 7.30。电动机为异步电机，安装在加长的飞轮壳中，连续输出功率为 6kW，短时间内最大功率可达 12kW。

该技术支持一个有限的制动能回收（达 6kW），并保证了起/停功能。该驱动设计不支持纯电动行驶，所以可以使用容量小且非常轻便的蓄电池。

样车的车载电网根据相应的功能需求进行了调整，见图 7.31。标准型和小型用电器由车载 24V 电网供电。为功率要求较高的用电器供电，如冷却液泵和助力转向泵，车载电网电压必须提升。电池系统由 24V 的 AGM 铅酸电池、42V 的镍氢电池和超级电容模块构成，既可以通过动力电池系统（镍氢电池），也可通过超级电容模块进行冷启动和快速启动。

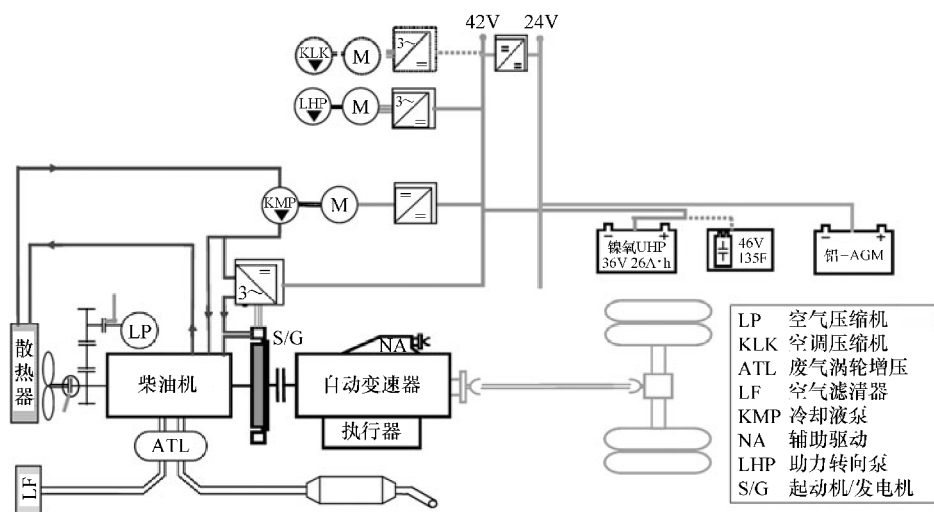


图 7.29 轻型货车中度混合动力的优化驱动方案

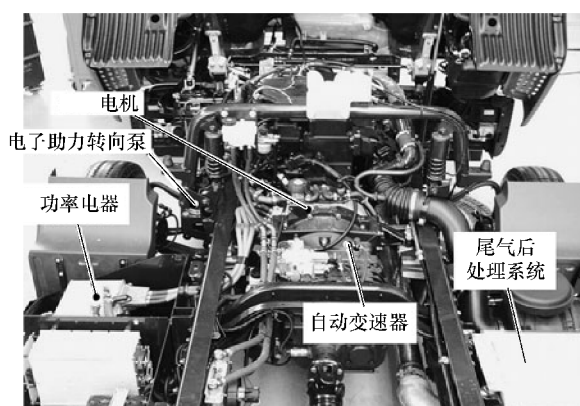


图 7.30 轻型货车中度混合动力驱动方案的样机

超级电容模块通过一个电压控制升压转换器进行充电。更多地使用再生能量不仅在节能上意义重大，但除了起/停功能以外，同时也增加了蓄电装置的使用循环。因此必须重视蓄电装置的循环稳定性，并通过加强对制动能量的再利用，找到保证电池使用寿命和降低成本之间的一个平衡点，原因在于电池的寿命与造价密切相关。

根据用户需要，样车可选择搭载 230V 标准装置作为功率可达 4.8kW 的行驶模式（车用电源）或待机模式（额外电源）。由此，在大多数情况下无需备用发电机。

在 2008 年商用汽车国际展览上，曼公司推出加强版 TGL 12220 混合动力轻型货车，见图 7.32。曼 TGL 混合动力半挂车搭载并联式混合动力系统，包括 ISG7 电机。ISG 电机位于离合器和变速器之间，既作为发电机又作为电动机。ISG 作为发电机工作时，为锂离子电池

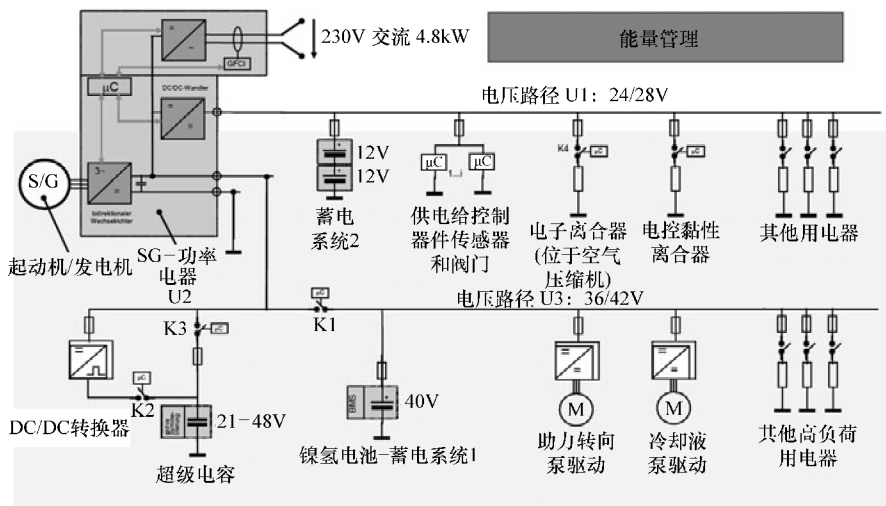


图 7.31 为完善功能而改良的全车车载电网结构

充电。作为电动机，ISG 用于车辆起动；在离合器断开时，也用于短距离纯电动行驶；离合器接合且车辆加速时，可为驱动轴提供转矩支持。



图 7.32 带有 ISG 混合动力系统的曼 TGL 12220 轻型货车

该混合动力系统省油和减排潜力最大的原因在于制动能回收（再生）。城市道路和派送过程中频繁起停成为曼 TGL 混合动力轻型货车的行驶常态。此外，柴油机空转时间被自动起/停装置大大缩短。

在保持车辆性能的基础上，辅助电机的应用可以让柴油机“瘦身”，同时达到省油减排的目的。用 4 缸代替 6 缸柴油机的混合动力车辆仅比同样性能的搭载 D8 型 6 缸柴油机车重不到 100kg。

性能优势：

- 1) 纯电动起动和超低速行驶；
 - 2) 柴油机工作点优化，负荷点提升和降低以达到最佳整体效率；
 - 3) 自动起/停装置；
 - 4) 能量再生（回收制动能）。
 - 5) 强化的 6kW·h 锂离子动力支持电池 5km 纯电动行驶距离，并带动电动辅助装置。
- 动力总成中的电气部件见图 7.33，技术参数见表 7.9。

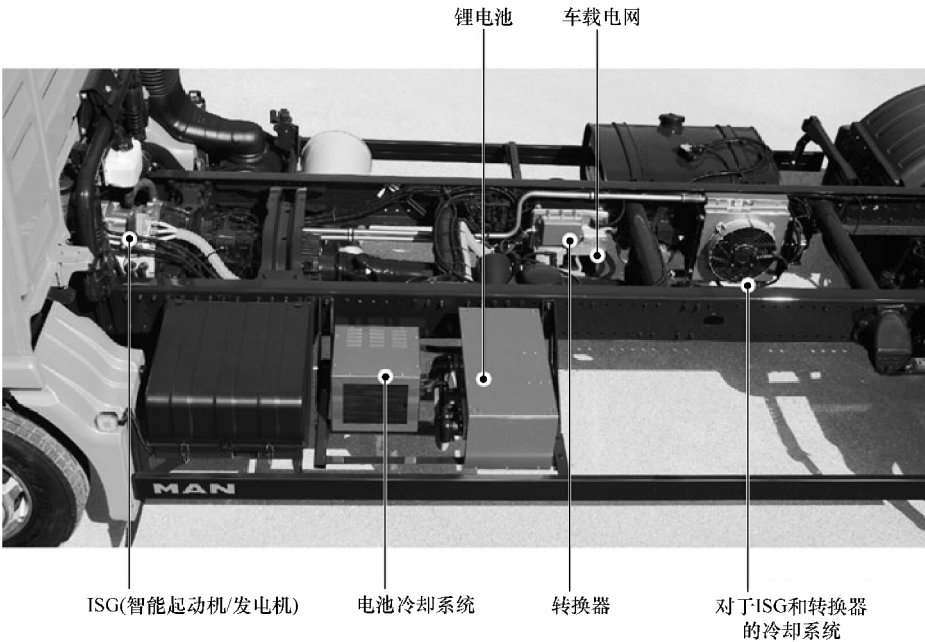


图 7.33 曼 TGL 混合动力传动链的电气组件

表 7.9 曼 TGL 混合动力技术参数

产地	德国
类型	货车
驱动	并联式混合动力，带有内嵌式起动机（ISG）
发动机	D0834 柴油机，二级增压器中冷，高压共轨，直喷 4 气门技术
气缸容积	4.580L

(续)

额定功率	162kW 当 2400r/min 时
最大转矩	850N · m 当 1300 ~ 1800r/min 时
排放标准	EEV 标准带曼 PM 三元催化转化器
变速器	6 档自动变速器, 由 TipMatic 软件适配混合动力
电驱动	三相电动机及发电机
最大转矩	425N · m
最大功率	60kW
运行电压	340V
电能量存储	锂离子电池, 电容量 2kW · h (选配 6kW · h)
电力续航里程	配备 6kW · h 电池, 约 5km

7.2.3 三菱扶桑 Canter Eco 混合动力轻型货车

三菱扶桑 Canter Eco 混合动力轻型货车是针对城区限行标准进行设计的, 如图 7.34 所示。Canter Eco 混合动力轻型货车设计源于奔驰货车, 三菱扶桑将该车型引入日本市场。在配送货物和城区内起停频繁状态下, 其省油性能相当优异。该轻型货车于 2006 年上市, 且只在日本市场出售。该轻型货车在欧洲进行过车队测试, 以确定是否适用于欧洲市场。为此, 适用于日本市场的 4.5t 或 5.5t 的车型增加至 7.5t, 供英国客户测试。



图 7.34 扶桑 Canter Eco 混合动力轻型货车

该轻型货车的混合动力总成为并联式混合动力,电机位于发动机和离合器之后、变速器之前。两台发动机可以单独、共同或并列驱动车辆。驱动部分以一台排量 3.0L 的 4 缸柴油机为基础。当发动机转速为 3200r/min 时,整体功率为 92kW;转速为 1700r/min 时最大扭矩为 294N·m。相对于该轻型货车的重量,其驱动机构结构紧凑、重量减轻——原本搭载了 Canter 7C18 型驱动系统,小型化后使用的是 Canter 7C13 型驱动系统。发动机配备废气再循环装置和炭烟微粒过滤器。根据欧洲排放标准和城市交通货车总重 7.5t 改装许可对该车进行了改装,转速为 3200r/min 时,功率提升至 107kW,转速为 1700r/min 时,最大扭矩达到 362N·m。因此,Canter Eco 混合动力轻型货车可以继续采用柴油机单独驱动,并配备由 24V 车载电网供电的起动机、发电机和起动力电池。Canter Eco 混合动力轻型货车的动力由 Inomat-II 5 速自动变速器进行传递。

离合器和变速器之间的电机为交流永磁电机,最大功率 35kW,最大扭矩 200N·m。在这方面,日本版和英国版的参数一致。

蓄电装置采用容量为 1.9kW·h 的锂离子电池。该动力电池由两个模块总共 96 块电极板组成。其使用寿命可达 10 年,至少可供行驶 30 万 km,动力电池及其保护壳位于该车左侧的框架内。整流器同样位于这一侧。该整流器通过脉宽调制装置实现直流电和交流电相互转换。

动力电池可储存回收的制动能,制动过程中电机作为发电机工作。为了增强制动能回收的效果,制动时离合器断开,发动机在无负荷状态下空转,不产生制动作用。电机带动车辆起动,柴油机所连接的离合器保持断开状态。柴油机空转时带动常规驱动的辅助装置。因此,Canter Eco 混合动力轻型货车起步时噪声小且几乎实现零排放。Canter Eco 混合动力轻型货车起步取决于电机的效率,也就是说在车辆静止时电机就能提供最大扭矩。在加速或较高功率需求时,如上坡路段,离合器接合,柴油机作为推进装置与电机同时用于驱动。当车辆达到一定的速度,由柴油机单独进行驱动,在平坦路面匀速行驶。在下坡过程中,电机作为发电机工作,将制动能转化为电能,并储存于动力电池中。同样,在日版 Canter Eco 混合动力轻型货车未采用的起/停功能将出现在欧版中。

该车型作为低油耗轻型货车符合日本的排放标准。2007 年推出的奔驰 Atego BlueTec 7.5t 混合动力轻型货车同样搭载扶桑 Canter Eco 的动力总成。三菱扶桑 Canter Eco 混合动力轻型货车的技术参数见表 7.10。

表 7.10 三菱扶桑 Canter Eco 混合动力轻型货车技术参数

产地	日本/德国
驱动	并联混合动力, 柴电技术
发动机	4 缸直列发动机 4M42 T2
燃料	柴油
气缸容积	2.977L
额定功率	日本: 92kW 当 3200r/min 时 欧洲: 107kW 当 3200r/min 时
电驱动	永磁式同步电机 PSM, 功率 35kW, 发电机功率 35kW, 锂离子电池, 电池容量 1.9kW·h
排放标准	日本: JD05 欧洲: 欧 4
量产	2006 年 6 月

同时出现第一个以扶桑 Canter Eco 混合动力轻型货车为基础的自卸式货车混合动力概念车。该款扶桑 Canter Eco - D 型货车的特点在于电动自卸功能。2009 年初,三菱扶桑客货车公司 (MFTBC) 推出 Canter Eco 混合动力轻型货车改进版。日版搭载一个可变几何涡轮增压装置,其功率增加至 96kW。改良后的混合动力控制使油耗继续降低。

7.2.4 奔驰福莱纳 M2

奔驰旗下北美最大的货车生产商福莱纳 (Freightliner) 也生产混合动力车辆。总重为 15t、搭载并联式混合动力总成的 M2 系列中型车辆主要针对北美市场,如图 7.35 所示。在北美,高架电缆维修凸显配备工作台工程车辆的重要性。在福莱纳的驱动系统中,电动部分不仅作为车辆驱动装置之一对柴油机进行支持,而且用于驱动辅助装置,从而使工作台升降中实现零排放、低噪声。高压动力电池可驱动液压系统。该优势同样适用于其他应用,如驱动车厢尾板、油罐车输油泵或消防车水泵,以及其他各类辅助装置。该功能还可以在不必要的操作中防止柴油机空转。



图 7.35 梅赛德斯·奔驰福莱纳 M2 混合动力车辆

M2 的驱动系统整合了一台排量 6.4L 的 6 缸直列式柴油机和一台电动机。该柴油机的序

列为 OM906（美国市场的标号为：MBE 906）。电机峰值功率为 44kW，最大转矩为 420N·m，同样应用于 Atego BlueTec 混合动力车辆（6 档自动变速）。蓄电装置为锂离子电池，其电容量为 5.5A·h，动力电池储存所回收的制动能。省油范围在 25% ~ 30% 之间，详细技术参数见表 7.11。

表 7.11 福莱纳 M2 的技术参数

产地	美国
形式	底盘带驾驶室，举升机结构
驱动	并联混合动力柴电技术
发动机	6 缸直列发动机 OM 906 LA
燃料	柴油
气缸容积	6.375L
额定功率	187kW 当 2200r/min 时
电驱动	永磁式同步电机功率 49kW，发电机功率 44kW，锂离子电池，电容量 1.9kW·h
排放标准	EPA 04
量产	2009 年

7.2.5 奔驰 Atego BlueTec 混合动力货车

重量为 12t 的奔驰 Atego BlueTec 混合动力货车采用福莱纳 M2 同款电机和奔驰 4 缸柴油机作为驱动组合，如图 7.36 所示。



图 7.36 梅赛德斯·奔驰 Atego BlueTec 混合动力货车（12t）

跟扶桑 Canter Eco 混合动力轻型货车以及福莱纳 M2 一样，奔驰 Atego BlueTec 混合动力采用的是并联式混合动力技术，其电机位于发动机和离合器之后、变速器之前。为了达到最

佳的省油效果，该车辆搭载符合新欧 5 排放标准的 4 缸发动机（代替 6 缸发动机）作为初级动力源。虽然电机不能在任何工况下弥补 4 缸和 6 缸柴油机之间的动力差别，但在城市交通车辆起步这一重要性能上可以达到同一水平。

蓄电装置采用功能强大的锂离子电池。该动力电池及其保护壳固定于 Atego 左侧车架上。该动力电池重约 125kg，可提供电力 $2\text{kW} \cdot \text{h}$ ，其电压为 340V，所有的电极板都处于独立监测和控制下。该动力电池配备独立的风冷装置。

根据不同的系统，奔驰 Atego BlueTec 混合动力货车较常规 Atego 1222 货车增加的重量为 300 ~ 400kg。

表 7.12 梅赛德斯·奔驰 Atego BlueTec 混合动力货车（12t）的技术参数

产地	德国
形式	底盘带驾驶室，箱式货车
驱动	并联式混合动力柴电技术
发动机	4 缸直列
燃料	柴油
气缸容积	4.800L
额定功率	160kW 当 2200r/min 时
最大转矩	810N · m 当 1400 ~ 1600r/min 时
电驱动	永磁同步电机，功率 44kW，最大转矩 420N · m，锂离子电池，电容量 1.9kW · h
变速器	6 档 G85 -6 型智能换挡自动变速器
排放标准	欧 5
量产	车队试车

奔驰 Atego BlueTec 混合动力货车的运行策略：首先电驱动起步，在达到一定的速度后，柴油机承担驱动系统的主要负荷。柴油机的驱动功率通过位于发动机和电动机之间的离合器接入。在达到该临界点之前，柴油机仅用于驱动辅助装置，因此不仅降低油耗和减少排放，还降低噪声对居民和行人的影响。由于采用发动机起/停系统，即驾驶人通过空档/空转按钮轻松操作变速杆，可以在遇到红灯停车时实现零油耗和零噪声。该系统使柴油机停止空转，通过调控使柴油机接近最佳工况是另一个省油的效果。

7.2.6 沃尔沃 FE 垃圾回收车

图 7.37 所示为沃尔沃 FE 垃圾回收车，该车搭载混合动力总成，已于 2009 年投产。

该车采用的混合动力技术为一台功率为 235kW、排量为 7L、符合欧 5 排放标准的柴油机搭配一台电动机，如图 7.38 所示。电机用于车辆起步和在 20km/h 速度以下驱动车辆，速度高于 20km/h 由柴油机进行驱动。该车的混合动力电动部件与沃尔沃 7700 混合动力公交车相同，参见本书 7.13 节。在停车时，通过名为沃尔沃 I - SAM（起动机、交流发电机和发动机集成）的起/停系统关闭柴油机，以避免其空转。该车采用沃尔沃 I - Shift 手自一体变速器。锂离子电池为功率 120kW 的电机供电，并通过回收制动动能充电。该动力电池重约 200kg，额定电压 80V，容量 480A · h。该系统尤其适用于起停频繁的车辆，如垃圾回收车：沃尔沃公司的设计目的是，该混合动力垃圾回收车最多可省油 20%，因此排碳量也同比例

降低。



图 7.37 沃尔沃 FE 混合动力垃圾回收车

此外，本样车搭载一个辅助电池组，为 16kW 垃圾压缩驱动装置供电。该垃圾回收车停放在车库中时，蓄电池通过普通电网进行充电。由此，排碳量再度降低 10%，也就是说跟常规的垃圾回收车相比，混合动力版排碳总量降低 30%。此外，电驱动系统大幅度降低了车辆噪声。锂离子电池电量不足时，可以通过车辆驱动来进行充电。

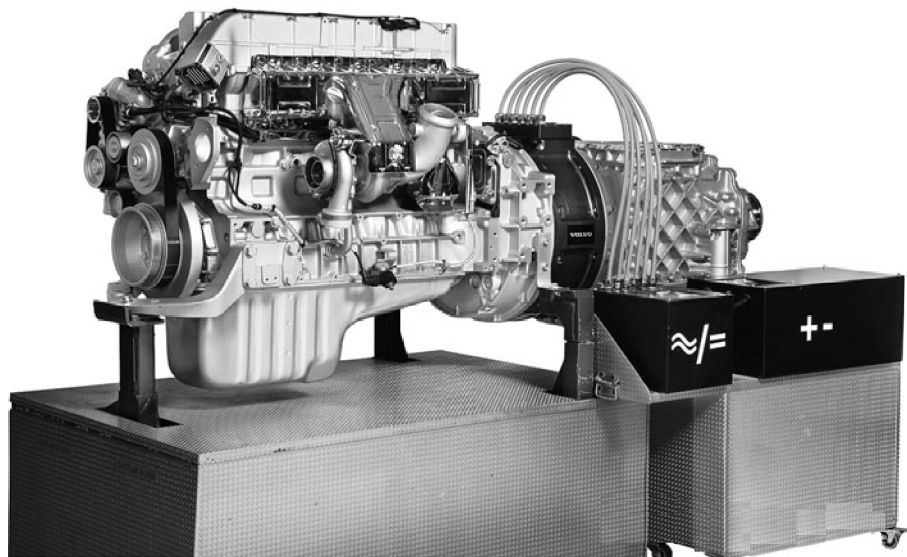


图 7.38 沃尔沃 FE 混合动力垃圾回收车的传动链

7.2.7 搭载液压再生制动系统的垃圾回收车

介于液压气动蓄能装置的高比功率密度，尤其适用于制动能再生，参见本书 4.4.11 “液压气动蓄能器”。具有高制动功率的车辆也就具备良好的制动和起步性能，应用于垃圾

回收车、城市公交车或叉车。图 7.39 所示为博世力士乐液压再生制动系统变速器在垃圾回收车中的应用原理。

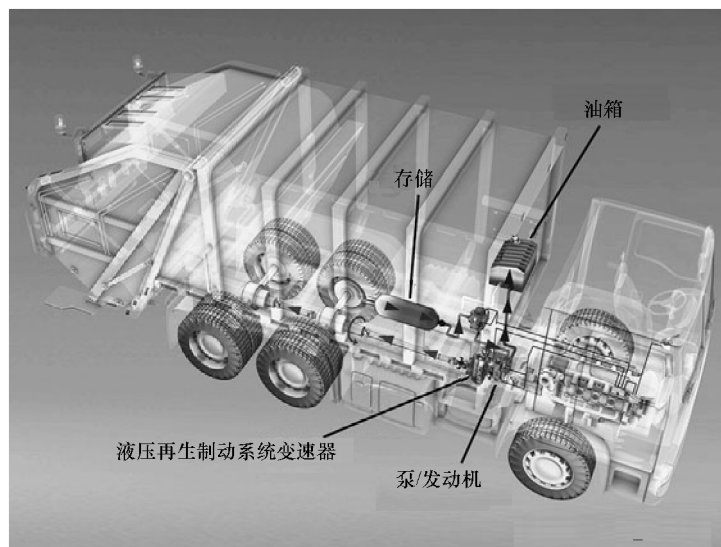


图 7.39 博世力士乐液压再生制动系统变速器原理图

德国 Fa. HALLER 公司与博世力士乐合作开发了垃圾回收车 x2eco，该车搭载液压 - 机械并联式混合动力驱动系统，如图 7.40 所示。该车自重 26t，发动机功率为 205kW，在测试运行中可省油 15% ~ 20%。



图 7.40 具有液压 - 机械并联式混合动力驱动系统的垃圾回收车 x2eco

近年来，混合动力汽车经历了一次极大的飞跃。在很长时间以前讨论的是混合动力技术能否在汽车领域占有立足之地，而现在讨论的是怎样的混合比例或者说电气化效率最高。这一技术横跨微混合动力及其起/停功能和电机管理到全混合动力汽车，但是要比较详细地描述未来的前景仍然有困难。据原译者根据汽车市场的现状加以分析，在中短期以内至少要实现起/停功能的一定覆盖面。长期而言，在行业内将打开低电功率和高电功率两极并存的局面，而中间部分的意义不大。因为使用低电功率的汽车，如微型和轻型混合动力汽车具有吸引人的性价比，便于进一步的普及，对于整车制造企业因为技术门槛和设备投入较低也更便于大量生产。高电功率如燃料电池或插电式混合动力汽车（带增程器），可以看作较长时期内大续航里程混合动力汽车的主流。

政策法规将对混合动力汽车的发展产生重大影响。根据框架条款中出现二氧化碳排放的指标、零排放技术的规定，体现出各种技术利弊，比如在美国设立特定区域对特定车辆限行，或实施税收及中国部分地区开放混合动力汽车上路牌照、免费停车等优惠政策。

除了大力发展以传统内燃机为基础的混合驱动技术以外，还将出现如燃料电池和纯电动车类新型驱动系统。以此为出发点，这些配备辅助能量储存和转换的驱动系统也属于混合动力。燃料电池汽车所配备的蓄电装置使制动过程中的能量回收成为可能，同时使冷启动时启动准备更快。由于已经存在电力驱动系统，只需再配备一个体积相对较小的蓄电装置即可体现混合动力的功能。

目前，推广纯电动车主要还是靠出台大量政策及配套充电装置。在中短期内，电池技术还无法达到化学能输入（加燃油）所能达到的续航里程和行驶时间的现行标准，因此这类车辆至少需配备一台小型内燃机作为增程器，由此为车内人员提供随时可用性、可以接受的续航里程和高/低温环境下的舒适性，使电动车可以更快地融入市场。高性能电池加小排量高效率内燃机的方案、原译者认为在可预见的将来（较长时期内）成为主流方案。

在接下来的较长时期内，随着燃料电池技术的进步，预计较完善、安全、方便的燃料电池汽车会大行其道。

本书开篇中的历史部分曾提到，混合动力技术的发展几乎与汽车的发展史同样悠久。在汽车发展初期，离合器、变速器和内燃机的调节性等方面发展不完善，于是需要引入混合动力技术，而如今混合动力驱动系统的能效、制动能回收、车辆安全性、舒适性、供暖、附加功能等主题更受欢迎。目前没有哪一种驱动系统可以达到十全十美，由于要求越来越高，未来的混合动力系统必将趋于成熟。

参 考 文 献

- [1] IPCC: Climate Change 2007 – Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Figure 2.3. IPCC, Geneva, Switzerland.
- [2] OECD Environmental Data COMPENDIUM 2006/2007.
- [3] KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN: MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DEN RAT UND DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT; Überwachung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen in der EU: Daten für die Jahre 2005, 2006 und 2007. Brüssel, den 27. 1. 2009; KOM(2009) 9 endgültig.
- [4] Trechnow, P.: EU zieht Daumenschrauben für PKW-Hersteller fest an. VDI Nachrichten Nr. 3, 16. Jänner 2009.
- [5] Hybridfahrzeug: Die Definition der UNO. Toyota Motor Corporation. Im Internet abrufbar: www.hybridsynergydrive.com/de/un_definition.html.
- [6] N. N: Modern Mechanix; US-Magazins; Jännerausgabe von 1932. <http://blog.modernmechanix.com/2006/09/22/compressed-air-motor-runs-car>
- [7] Hans Seper: Damals als die Pferde scheuten – Die Geschichte der Österreichischen Kraftfahrt. Österreichischer Wirtschaftsverlag Wien, 1968.
- [8] Pinczolit Franz: Austro Daimler, Paul Daimler und Ferdinand Porsche – Pioniere des Automobils. Weilburg Verlag, ISBN 3-900100-42-X, 1986.
- [9] <http://www.im-auto.de/hybridantrieb/entwicklung.html>
- [10] <http://www.econogics.com/ev/evhistg.htm>
- [11] Fiala Ernst: Hybridauslegung für Personenkraftwagen. Herausgeber: Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik, 2006.
- [12] Hofmann, L.; Leohold, J.; Steiger, W.; Böhm, T.: twinDRIVE® – Ein Schritt in Richtung Elektromobilität. 6. VDI Tagung: Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden, 6. und 7. 11. 2008, VDI-Verlag Düsseldorf 2008.
- [13] Mikulic, L.: DaimlerChrysler – Powertrain-Strategie: Globale Anforderungen – Globale Lösungen. 28. Internationales Wiener Motorensymposiums 2007, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 639, Beilage.
- [14] Automobil Produktion, Mai 2008, Oliver Wyman-Studie „Car Innovation 2015“ Verlag moderne Industrie GmbH.
- [15] Pichler, P.; Linderl, J.; Niederlechner, G.; Schmidhofer, A.; Teuschl, G.; Kramer, F.; Erjawetz, K.; Müller, H.; Kussmann, C.: Full Hybrid SUV mit elektrischem 4WD – praktische Ergebnisse. 28. Internationales Wiener Motorensymposiums 2007, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 639, Bd. 1, Seite 360–375.
- [16] McKinsey & Company, Inc.: Studie Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland. Im Auftrag von „BDI initiative – Wirtschaft für Klimaschutz“ – AG Transport 2007.
- [17] Fehrenbach, F: Herausforderungen globaler Zulieferunternehmen, 29. Internationales Wiener Motorensymposiums 2008, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 672, Bd. 2, Seite 344–360.
- [18] Küçükay, F.; Scholz, N.: Elektrisch leistungsverzweigte Stufenlosantriebe für Hybridfahrzeuge. 3. Braunschweiger Symposium Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, Braunschweig 2006.
- [19] Kaehler, B.; Kersting, K.; Brouwer, M.; Christ, C.: Entwicklungskriterien, Analysemethoden und Beurteilung von leistungsverzweigten Hybridgetrieben, am Beispiel eines Two-Mode Hybridantriebs. 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug-

- und Motorentchnik 2007.
- [20] Böcker, J.: Antriebe für umweltfreundliche Fahrzeuge. Skript zur Vorlesung. 17.01. 2006.
 - [21] Müller, H. W.: Die Umlaufgetriebe: Auslegung und vielseitige Anwendungen. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 2. Auflage 1998, ISBN 3-540-63227-1.
 - [22] Benford, H. L.; Leising, M. B.: The Lever Analogy: A New Tool in Transmission Analysis. SAE Paper 810 102.
 - [23] Küçükay, F.; Scholz, N.: Elektrisch leistungsverzweigte Stufenlosantriebe für Hybridfahrzeuge. Neue elektrische Antriebskonzepte für Hybridfahrzeuge. Haus der Technik Essen. Haus der Technik Fachbuch Band 80, 2007.
 - [24] Grewe, T. M.; Conlon, B. M.; Holmes, A. G.: Defining the General Motors 2-Mode Hybrid Transmission. SAE 2007-01-0273.
 - [25] Truckenbrodt, A.; Nitz, L.; Eppe, W.: Two Mode Hybrids – Adaptionsstärkern eines Intelligenten Systems. 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik 2006.
 - [26] Kriegler, W.: Alternative Antriebe – Grundlagen. Skriptum zur Vorlesung VKM II, FH Joanneum Fachhochschulstudiengänge – Fahrzeugtechnik Automotive Engineering.
 - [27] Bitsche, O.: Vom Verbrennungsmotor zum Elektrofahrzeug. ÖAMTC Expertenforum, Wien 30.04. 2009.
 - [28] Liebl, J.: Energiemanagement – Ein Schlüssel für Effiziente Dynamik. VDI-Berichte Nr. 1975, VDI-Tagung „Innovative Fahrzeugantriebe“, 9. und 10. November 2006, Dresden.
 - [29] Knoth, H.; Wilstermann, H.: Automatisches Stopp-Start-System mit riemengetriebenem Starter-Generator am Beispiel der A/B-Klasse von Mercedes Benz. Tagung: Automatische Start/Stopp Systeme. Haus der Technik. 3. u. 4. Dezember 2008, München.
 - [30] Schuermans, R.: Toyota Hybrid Vehicles – Technology Evolution from 1997 to 2007. 5th Symposium Hybrid Vehicles and Energy Management. 20th and 21st Feb. 2008 Braunschweig.
 - [31] Fischer, R.: Die Elektrifizierung des Antriebs – vom Turbohybrid zum Range Extender. 30. Internationales Wiener Motorensymposium 2009. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 697.
 - [32] Steiger W., Volkswagen AG: European Forum Alpbach 2008.
 - [33] IVT im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn: Analyse von Änderungen des Mobilitätsverhaltens – insbesondere der PKW-Fahrleistung – als Reaktion auf geänderte Kraftstoffpreise.
 - [34] Fischer, R.: Trade Off: Verbrauch – Fahrspaß? ÖVK Vortrag 4. 3. 2008, Herausgeber: Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik, 2008.
 - [35] Geringer, B.; Tober, W.; Rosenitsch, R.: Abschlussbericht: Prognose der gesetzlich limitierten Straßenverkehrsemissionen in Österreich und Deutschland bis 2030. TU Wien 2009.
 - [36] Europäisches Parlament: Richtlinie 88/77/EWG des Rates vom 3. Dezember 1987 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Emission gasförmiger Schadstoffe aus Dieselmotoren zum Antrieb von Fahrzeugen. Amtsblatt der Europäischen Union. 9. 2 1988, L36, S. 33–61.
 - [37] Europäisches Parlament: Richtlinie 91/542/EWG des Rates vom 1. Oktober 1991 zur Änderung der Richtlinie 88/77/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Emission gasförmiger

- ger Schadstoffe aus Dieselmotoren zum Antrieb von Fahrzeugen. Amtsblatt der Europäischen Union. 25. 10. 1991, L295, S. 1–19.
- [38] Europäisches Parlament: Richtlinie 96/1/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Januar 1996 zur Änderung der Richtlinie 88/77/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Emission gasförmiger Schadstoffe und ... Amtsblatt der Europäischen Union. 17. 2. 1996, L40, S. 1–9. Berichtigung in ABl. L155 vom 28. 6. 1996, S. 63–64.
- [39] Europäisches Parlament: Richtlinie 1999/96/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Dezember 1999 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Emission gasförmiger Schadstoffe und luftverunreinigender Partikel aus ... Amtsblatt der Europäischen Union. 16. 2. 2000, L44, S. 1–155.
- [40] Europäisches Parlament: Richtlinie 2001/27/EG der Kommission vom 10. April 2001 zur Anpassung der Richtlinie 88/77/EWG des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Emission gasförmiger Schadstoffe und ... Amtsblatt der Europäischen Union. 18. 4. 2001, L107, S. 10–23. Berichtigung in ABl. L266 vom 6. 10. 2001, S. 15.
- [41] Europäisches Parlament: Richtlinie 2005/55/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. September 2005 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Emission gasförmiger Schadstoffe und luftverunreinigender Partikel aus ... Amtsblatt der Europäischen Union. 20. 10. 2005, L275, S. 1–163.
- [42] Europäisches Parlament: Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Juni 2009 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Motoren hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur ... Amtsblatt der Europäischen Union. 18. 7. 2009, L188, S. 1–13.
- [43] Peier, O.: Gewinnt das Elektroauto das Rennen der alternativen Antriebe? Vortrag beim Expertenforum „Vom Verbrennungsmotor zum Elektrofahrzeug“.
- [44] <http://www.tfl.gov.uk/roadusers/congestioncharging>
- [45] Winter, St.: Simulationsgestützte Optimierung eines Parallelhybridantriebsstranges durch methodische Adaptierung eines modernen direkteinspritzenden aufgeladenen Ottomotors. Dissertation TU Wien, 2008.
- [46] Hohenberg, G.; Indra, F.: Theorie und Praxis des Hybridantriebs am Beispiel Lexus RX 400h. 27. Internationales Wiener Motorensymposiums 2006, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 622, Bd. 1, Seite 180–203.
- [47] Mohrdieck, C.; Truckenbrodt, A.; Portmann, D.: Plug-In Hybrid Technology. 5th Symposium Hybrid Vehicles and Energy Management. 20th and 21st Feb. 2008 Braunschweig.
- [48] Spiegel, L.; Kraxner, D.; Neußer, H. J.: Das Hybridkonzept von Porsche. 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2007.
- [49] Bauer, R.; Raste, T.; Rieth, P. E.: Systemvernetzung von Hybridantrieben. ATZ-Elektronik 04/2007.
- [50] Merkle, M.: Einfluss Start-Stopp auf Bordnetz und Generator. 3. VDI Tagung: Energieeinsparung durch Elektronik im Fahrzeug, Baden-Baden, 15. u. 16. Oktober 2008. VDI Verlag Düsseldorf 2008.
- [51] Alt, M.; Grebe, U. D.; Nait, P.; Wermuth, N.; Huebler, M.; Reuss, D.: HCCI – vom thermodynamischen Potenzial zum realen Kraftstoffverbrauch im Mehrzylinder-Ottomotor. 11. Tagung „Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors“ 20./21. September 2007.

- [52] Pichler, P.; Erjawetz, K.; Schmidhofer, A.; Zöhrer, F.: 4 × 4 Hybridmodul mit elektrischer Vorderachse. 6. Grazer Allradkongress – Allrad zwischen Motorsport und Hybridantrieb, 3. und 4. Februar 2005.
- [53] Schneider, E.; Lindemann, M.; Freimann, R.; Cebulski, B.: Konzept eines aktiv momentenverteilenden Achsdifferential mit Hybridfunktionalität. Neue elektrische Antriebskonzepte für Hybridfahrzeuge. Haus der Technik Essen. Haus der Technik Fachbuch Band 80, 2007.
- [54] Bitsche, O.; Raumer, T.; Connolly, T.: Ram Contractor Special – Hybrid Truck mit On-Board Stromerzeugung. 10. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2001.
- [55] Noreikat, E.: Antriebstechnik, die die Welt (nicht) braucht. VDI-Bericht 1704, 2002.
- [56] Zeitschrift: „Motorrad Classic“, Motor-Presse Verlag Stuttgart, Ausgabe 3/98.
- [57] Meijer, R.J.: Der Philips-Stirling Motor. MTZ-Motortechnische Zeitschrift, 29. Jahrgang, Nr. 7, Juli 1968.
- [58] Wallentowitz, H.: Unkonventionelle Kraftfahrzeugantriebe. Schriftenreihe Automobitechnik, Vorlesungsumdruck, Institut für Kraftfahrwesen Aachen ifka RWTH, 2003.
- [59] Treffinger, P.; Gräf, M.: Brennstoffzellensysteme und hoch integrierte Verbrennungsmotor/Generator-Kombinationen für Hybridantriebe. Hybridfahrzeuge Burghard Voß (Hrsg.), Haus der Technik Fachbuch Band 52, expert Verlag, 2005, ISBN 3-8169-2501-4.
- [60] Bouvier, S.: Charakterisierung permanentmagneterregter Synchronmaschinen für den Einsatz in elektrischen Achsen. Diplomarbeit. Institut für elektrische Maschinen und Antriebstechnik (EMA), Technische Universität Graz, November 2007.
- [61] Hofer, K.: Elektrotraktion – Elektrische Antriebe in Fahrzeugen. VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach ISBN 978-3-8007-2860-2, 2006.
- [62] Binder, A.: Elektromotorische Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. VDI Wissensforum „Hybrid- und Elektroantriebe für Kraftfahrzeuge“ 22.–23. Juni 2009 Frankfurt/Main.
- [63] Hackmann, W.; Wagner, B.; Zwingel, R.; Dziedzic, I.; Welke, K.: Fremderregte Synchronmaschinen im Einsatz als Achshybridantriebe. Internationaler ETG-Kongress 2007, 23. bis 24. Oktober 2007, Karlsruhe, Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG).
- [64] Weil, M.; Bergelt, C.: Untersuchungen zu entwicklungstechnischen Potenzialen hocheffizienter Antriebe. Kurzstudie im Auftrag des Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie. Fraunhofer Institut Verkehrs- und Infrastruktursysteme Dresden 2006.
- [65] N.N. Produktinformation SERVAX Landert Motoren AG, CH-8180 Bülach-Zürich, www.servax.com.
- [66] Fister, M.: Serienanforderungen an die elektrische Maschine im Hybridfahrzeug. Tagung: Hybridantrieb – die Zukunft des Automobilantriebs, 16.–17. Juni 2005 in Berlin.
- [67] Grabner, B.: Drehmomentberechnung einer Transversalflussmaschine über ein dreidimensionales Finite Elemente Modell. Dissertation TU Wien, Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe, 1998.
- [68] Weh, H.: Berechnungsgrundlagen für Transversalflussmaschinen. Archiv für Elektrotechnik, 71, 1988.
- [69] Bork, M.: Entwicklung und Optimierung einer fertigungsgerechten Transversalflussmaschine. Dissertation RWTH Aachen, Aachen 1997.
- [70] Schhüttler, J.; Orlik, B.: Simulation einer Transversalflussmaschine in Flach-

- magnetanordnung. NAFEMS Magazin 2/2006.
- [71] Graaf, R.: Simulation hybrider Antriebskonzepte mit Kurzzeitspeicher für Kraftfahrzeuge. Dissertation am Institut für Kraftfahrwesen Aachen, RWTH Aachen, 2000.
 - [72] Langer, U.; Schmidt, M.; Sellinger, R.: Entwicklungspotenzial bei und Einsatzmöglichkeiten von alternativen Antriebskonzepten im OPNV. Studie am Lehrgebiet FMU an der FH Köln in Zusammenarbeit mit dem VDV, 1998.
 - [73] Grebe, U. D.: „GM's Advanced Propulsion Technology – Solutions for Efficiency Improvements and Energy Diversity,“ in VDI-Berichte 2029: Getriebe in Fahrzeugen 2008. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2008.
 - [74] Berger, R.; Dilzer, M.; Reitz, D.: ESG – Elektrisches Schaltgetriebe. Hybridkomponenten für Automobile der Zukunft. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 107 (2005) 6, Seite 488–497.
 - [75] Fister, M.; Bartha, A.: Hybrid Module from ZF Sachs, the Space Optimized Hybridization of the 8-P Automatic Transmission. 5th Symposium Hybrid Vehicles and Energy Management. 20th and 21st Feb. 2008 Braunschweig.
 - [76] Höhn, B.-R.: CVT-Hybrid für PKW. Tagung Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen, Autor: Marcus Geimer und 11 Mitautoren, Herausgeber: WVMA e. V. Wissenschaftlicher Verein für Mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruhe c/o Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen, Universität Karlsruhe, Februar 2007.
 - [77] Höhn, B.-R.; Pflaum, H.; Krastev, I.; Lechner, C.: Bereichsumschaltung und Verbrennungsmotorstart im optimierten CVT-Hybrid-Antriebsstrang. VDI-Tagung „Fahrzeuggetriebe 2006“ (2006).
 - [78] Lutz, J.: Halbleiter-Leistungsbaulemente. Physik, Eigenschaften, Zuverlässigkeit. Verlag: Springer Berlin Heidelberg, 2006, ISBN: 978-3-540-34207-6.
 - [79] Falk, A.; Wachenfeld, V.: DC/DC-Wandler: Schnittstelle zwischen Batterie und Antrieb. Hybridfahrzeuge, Burghard Voß (Hrsg.) Expert Verlag ISBN 3-8169-2501-4.
 - [80] Caldevilla, A.: Untersuchung von elektrischen Speichersystemen für den Einsatz in Hybridfahrzeugen. Dissertation, Institut für Elektrische Antriebe und Maschinen, TU Wien 2008.
 - [81] H. Menrad, A. König; Alkoholkraftstoffe; Springer-Verlag Wien-New York 1982; ISBN 3-211-81696-8/0-387-81696-8.
 - [82] Sven Geitmann: Alternative Kraftstoffe – Womit fahre ich am besten? Hydrogeit Verlag, Oberkrämer, Oktober 2008, ISBN 978-3-937-86312-2.
 - [83] Schindler, V.: Kraftstoffe für Morgen; Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1997.
 - [84] Rosenkranz, C. A.; Köhler, U.; Liska, J.-L.: Battery Systems for the Growing and Diversified Hybrid Electric Vehicle Market. Neue elektrische Antriebskonzepte für Hybridfahrzeuge. Haus der Technik Essen. Haus der Technik Fachbuch Band 80, 2007.
 - [85] Jossen, A.: Einführung in elektrochemische Speicher. Otti Fachforum „Wiederaufladbare Batteriesysteme“ Ulm, 3./4. Mai 2006.
 - [86] Schmidt, V. M.: Elektrochemische Verfahrenstechnik. WILEY-VCH Verlag GmbH, ISBN 3 527 299 580, 2003.
 - [87] Köhler, U.: Batterien für Elektro- und Hybridfahrzeuge. In Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge. TAE Kontakt & Studium Band 255; Expert Verlag.
 - [88] Köhler, U.; Rosenkranz, C. A.: Nickel Metall Hydride and Lithium-Ion Batteries for Hybrid Electric Vehicles – Cars, Busses and Light Trucks. 3. Braun-

- schweiger Symposium Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, Braunschweig 2006.
- [89] Brockbank, C.: Full Toroidal CVT in a Mechanical Hybrid Configuration. 6th International CTI Symposium „Innovative Automotive Transmissions“, Berlin, 3–7 December 2007.
- [90] Gründl, A.: Bauraum- und Kostenoptimierte Komponenten für Hybridfahrzeuge. Neue elektrische Antriebskonzepte für Hybridfahrzeuge. Haus der Technik Essen. Haus der Technik Fachbuch Band 80, 2007.
- [91] Kliffken, M. G.; Ehret, C.; Stawiarski, R.: Hydrostatisch Regeneratives Bremssystem (HRB) für Nutzfahrzeuge und mobile Arbeitsmaschinen. 6. VDI Tagung: Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden, 6. und 7. 11. 2008, VDI-Verlag Düsseldorf 2008.
- [92] N. N. HYDAC International – Speichertechnik Produktkatalog. D 30 000.1/09.08 HYDAC Technology GmbH. Industriegebiet, D-66 280 Sulzbach/Saar, 2008.
- [93] Findeisen Dietmar: Ölhydraulik, 5. Auflage, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg 2006.
- [94] Achten, P.; Vael, G.; Murrenhoff, H.; Kohmächer, T.; Inderelst, M.: Emissionsarmer Hydraulik-Hybridantrieb für Personenwagen. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 111 (2009) 5, Seite 378–387.
- [95] Palmen, A. et al: Wirkungsgraduntersuchung an einer Floating Cup-Axialkolbenpumpe. IFAS RWTH Aachen, 2007.
- [96] Oertel, D.: Energiespeicher – Stand und Perspektiven. Sachstandsbericht zum Monitoring »Nachhaltige Energieversorgung«, Büro für Technikfolgen – Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Arbeitsbericht Nr. 123, Februar 2008.
- [97] Böhm, T.; Nolte, O.; Richter, T.: Li-Ionen Batterien Schlüsseltechnologie für die Mobilität. 6. VDI Tagung: Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden, 6. und 7. 11. 2008, VDI-Verlag Düsseldorf 2008.
- [98] Bek, M.; Schiele, P.: Der hydraulische Impulsspeicher – ein Beitrag der ZF-Automatgetriebe zur CO₂-Reduzierung. 29. Internationales Wiener Motorensymposiums 2008, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 672, Bd. 2.
- [99] Wiertz, A.; Gessat, J.: Eine neue Generation elektro-hydraulischer Servolenkungen. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 107 (2005) 7–8, Seite 586–593.
- [100] Harrer, M.; Schmitt, T.; Fleck, R.: Elektromechanische Lenksysteme – Herausforderungen und Entwicklungstrends. 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2006.
- [101] Weinbrenner, M.; Manski, R.; Kerler, B.; Heinle, D.: Speicher-Klimatisierung für Hybridfahrzeuge mit Start-Stopp-Funktion. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 108 (2006) 12, Seite 1002–1008.
- [102] Wallentowitz, H.; Reif, K.: Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen. Vieweg+Teubner Verlag; 1. Auflage 2006; ISBN 978-3-528-03971-4.
- [103] Zimmermann, W.; Schmidgall, R.: Bussysteme in der Fahrzeugtechnik: Protokolle und Standards. Praxis/ATZ/MTZ-Fachbuch. Vieweg+Teubner Verlag; 3. Auflage 2008; ISBN 978-3-834-80447-1.
- [104] Guzella, L.; Sciarretta, A.: Vehicle Propulsion Systems. Introduction to Modeling and Optimization. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2007, ISBN 978-3-540-74691-1.

- [105] Prachar, T.: Vergleich und Optimierung verschiedener Hybridfahrzeugkonzepte mittels eines erstellten Simulationsmodells in Dymola. Dissertation am IVK der TU Wien, 2006.
- [106] Pöltenstein, A.: Betriebsstrategieoptimierung von alternativen Fahrzeugantriebskonzepten unter besonderer Berücksichtigung aktueller Hybridtechnologien. Dissertation am IVK der TU Wien, 2006.
- [107] Winter, St.: Die Betriebsstrategien der K-net – Hybridkonzepte. Bericht für die wissenschaftliche Zwischenevaluierung des Kompetenznetzwerks K-net KFZ durch die Christian Doppler Forschungsgesellschaft, IVK der TU Wien, 2005.
- [108] Prachar, T.; Pöltenstein, A.; Magerl, L.; Winter S.; Lux, G.; Caldevilla, A.; Hofmann, P.: Consideration of different hybrid powertrains with the help of a model in longitudinal dynamic using Dymola™. 2006 SAE World Congress, Cobo Center, Detroit, USA (eingeladen); 03.04. 2006–06.04. 2006 Doc. No. 2006–01–1126, SP-2008.
- [109] Mitschke, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band A, Springer, Berlin-Heidelberg 1995.
- [110] Lux, G.; Winter, S.; Hofmann, P.; Geringer, B.: Application of Thermal Management to Reduce Fuel Consumption in Hybrid Power Trains. 5th Symposium Hybrid Vehicles and Energy Management. 20th and 21st Feb. 2008 Braunschweig.
- [111] Lange, S.; Schimanski, M.; Varchmin, J. U.: Prognose als Basis für die Betriebsstrategie in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Tagung: Innovative Fahrzeugantriebe 9. & 10. 11. 2006, Dresden, VDI-Berichte Nr. 1975, 2006.
- [112] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR: Mobilität in Deutschland 2002 – Kontinuierliche Erhebung zum Verkehrsverhalten, 2004.
- [113] Webpage: <http://www.kfztech.de/Unterricht/projekt/Hybridantrieb.htm>; 05. 09. 2004
- [114] Webpage: <http://www.toyota.de/showroom/prius2003/gallery.html>; 05. 09. 2004
- [115] Yamaguchi, J.: Toyota Prius: aei Best Engineered Vehicle 2004; Automotive Engineering International, March 2004, p. 42–44.
- [116] Yamaguchi, J.: Toyota Prius: aei Best Engineered Vehicle 2004; Automotive Engineering International, March 2004, p. 58–68.
- [117] N. N: HYBRID SYNERGY DRIVE – TOYOTA HYBRID SYSTEM THS II; Toyota Motor Corporation, Public Affairs Division, 4–8 Koraku 1-chome, Bunkyo-ku, Tokyo, 112–8701 Japan, May 2003.
- [118] Webpage: <http://www.toyota.co.jp/en/tech/environment/ths2/>; 05. 09. 2004
- [119] N. N: Neues Modell Training PRIUS, TOYOTA FREY Austria Ges. m. b. H, Wien, Juli 2000.
- [120] Hirose, K.; Ueda, T.; Takaoka, T.: Ein neues Antriebssystem für den Toyota-Hybrid-PKW mit einem hoch effizienten Ottomotor. 19. Internationales Wiener Motorensymposium 1998, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 348, Bd. 1, Seite 297–316.
- [121] Takaoka, T.; Killmann, G.: Der Hybridantrieb des neuen Toyota Prius. 18. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2009.
- [122] Yukihiro Sonoda, Shinichi Abe: Entwicklung des Hybridsystems und des Abgasreduktionssystems für den Lexus GS450h. 27. Internationales Wiener Motorensymposium 2006, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 622, Bd. 1, Seite 180–203.

- [123] Shinya Kubota, Takeshi Sakurai, Hidenori Okada: Size and Weight Reduction Technology for a Hybrid System. SAE 2009–01–1339.
- [124] Abe, S.; Brachmann, T.; Iijima, T.; Hasegawa, K.; Matsuoka, T.; Murata, M.; Nakamura, M.: The New Honda Civic Hybrid: Development Goals and Achievements. Neue elektrische Antriebskonzepte für Hybridfahrzeuge. Haus der Technik Essen. Haus der Technik Fachbuch Band 80, 2007.
- [125] Vollrath, O.: S400 BlueHYBRID – First Hybrid Vehicle with Li-Ion Technology. 30. Internationales Wiener Motorensymposium 2009. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 697.
- [126] Armstrong, N.; Schenk, J.; Nietfeld, F.; Inderka, R.; Weiss, M.: Der Hybridantrieb mit höchster elektrischer Leistungsdichte für den ML 450 BlueHYBRID. 30. Internationales Wiener Motorensymposium 2009. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 697.
- [127] Langen, P.; Klütting, M.; Wier, M.; Kessler, F.; Curtius, B.; Braun, H.: Der Full Hybridantrieb im BMW X6. 30. Internationales Wiener Motorensymposium 2009. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 697.
- [128] Patent WO 2006/034 520 A1 Drive Unit for Motor Vehicles with Hybrid Drive in a longitudinal Arrangement MAGNA STEYR.
- [129] Schmidhofer, A.; Zöhrer, F.; Starzinger, J.; Erjawetz, K.; Teuschl, G.; Hartmann, V.; Prix, D.: Antriebsstranghybridisierung eines Full Size SUV – Entwicklung und Validierung eines multifunktionellen E4WD Traktionsmoduls. Neue elektrische Antriebskonzepte für Hybridfahrzeuge. Haus der Technik Essen. Haus der Technik Fachbuch Band 80, 2007.
- [130] Heilenkötter, D.; Philipp, K.; Stiebels, B.: Der Triebstrang des Touareg Hybrid. VDI Tagung Getriebe in Fahrzeugen 2008, Friedrichshafen 17. und 18. Juni 2008, VDI Verlag GmbH Düsseldorf 2008.
- [131] Ellinger, R.; Ebner, P.; Schneider, R.: Der Turbohybrid – Umsetzung eines gesamtheitlichen Ansatzes für einen modernen Ottohybrid-Antrieb. 6. VDI Tagung: Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden, 6. und 7. 11. 2008, VDI-Verlag Düsseldorf 2008.
- [132] Rinderknecht, S.; Seufert, M.; Ellinger, R.; Schneider, R.; Wagner, J.: ECO TARGET: Ein innovativer Antriebsstrang zur Erfüllung zukünftiger Mobilitätsanforderungen. 25. Internationales Wiener Motorensymposium 2004, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 566, Bd. 2, Seite 180–199.
- [133] Fischer, R.; Kirsten, K.: Der Turbohybrid – Gesamtheitlicher Ansatz für einen modernen Ottohybrid Antrieb. 27. Internationales Wiener Motorensymposium 2006, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 622, Bd. 1, Seite 137–161.
- [134] H. List, P. Schoeggl: „Objective Evaluation of Vehicle Driveability“, SAE 980 204, Detroit, USA.
- [135] GM Media Online: Pressemappe: Opel Flextreame 2007–09–13.
- [136] Dr. T. Böhm, Dr. R. Kube, Dr. L. Hofmann, Volkswagen AG: Energiemanagement für Hybridantriebsstränge, 3. Braunschweiger Symposium Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, 02. Februar 2006.
- [137] N.N.: „Japan Report: Toyota’s Watershed Hybrid Racer Victory At Tokachi“ (bei windingroad.com am 19. Juli 2007)
- [138] Daimler: Presse-Information, 23. September 2009.
- [139] Kersch, S.; Lexen, G.: Hybridantriebe für Nutzfahrzeuge, Tagungsband „Hybridfahrzeuge“, expert-Verlag, Renningen, 2005.
- [140] <http://sustainability2008.daimler.com>

- [141] Hipp, E.; Kersch, S.; Döbereiner, R.: Assessments of Hybrid Drives for City Buses. F2008-06-031. FISITA World Automotive Congress 2008, The Future of Automobiles and Mobility, Munich, Germany, 14-19 September 2008.
- [142] MAN Presse Information München 08.06.2009.
- [143] <http://www.hess-ag.ch>
- [144] Unruh, R.: Grüne Welle – Fahrbericht Volvo 7700 Hybrid. Lastauto Omnibus 9/2009.
- [145] Unruh, R.: Aller guten Dinge sind drei – Vorstellung: Irsibus Hynovis. Lastauto Omnibus 10/2008.
- [146] Chiang, P. K.: Two-Mode Urban Transit Hybrid Bus In-Use Fuel Economy Results from 20 Million Fleet Miles. SAE 2007-01-0272, SAE Technical Paper Series, Apr. 2007.
- [147] Overgaard, L.; Folkesson, A.: Scania hybrid concept – with robust technology into the future. 57th UITP World Congress: Public transport: Moving people, moving cities, Helsinki, 20-24 May 2007.
- [148] Rosenberger, T.: Reise ins Morgenland. Lastauto Omnibus 9/2009.
- [149] Wolf, A.: In doppelter Mission – Hybridtechnik: Entsorgungsfahrzeug von Volvo. Lastauto Omnibus 6/2008.
- [150] Silvan, E.: Strategien der Hersteller von Entsorgungsfahrzeugen zur Verringerung der Lärm- und NO₂-Emissionen. IAA Nutzfahrzeuge 2008, 30. 09. 2008 – Symposium zum Tag des Kommunalfahrzeugs.
- [151] Basshuysen, R. V.; Schäfer, F.: Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. Verlag Vieweg+Teubner Verlag, 2007; ISBN 3-834-802271, 9-783-834-802279.
- [152] L 158/34 DE Amtsblatt der Europäischen Union 19. 6. 2007. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:158:0034:0105:DE:PDF>

国际视野 科技前沿

汽车先进技术译丛·新能源汽车系列

发动机试验理论与实践
如何将汽车制成精品
汽油车近零排放技术
车辆动力学及控制
载货汽车技术
轻量化设计——计算基础与构件结构 第2版
汽车总线系统
制动技术手册
减振器手册
汽车底盘手册
汽车工程手册（德国版）
汽车工程手册（美国版）
汽油机直喷技术
轻量化
汽车轮胎研发
汽车轻量化
车辆操纵动力学——理论与应用
振动阻尼、控制和设计
电动汽车实用技术（双语版）
汽车电力电子装置与电机驱动器手册
汽车变速器理论基础、选择、设计与应用
汽车及其驱动系统虚拟产品开发
汽车电子技术——硬件、软件、系统集成和项目管理
如何在交通运输中降低油耗与废气排放
汽车主动制动控制系统设计
汽车嵌入式系统手册
车辆操纵动力学（原书第2版）
车联网通信技术
混合动力汽车技术
车载ad hoc网络的安全性与隐私保护

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037

电话服务

服务咨询热线：010-88361066

读者购书热线：010-68326294

010-88379203

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工微博：weibo.com/cmp1952

金书网：www.golden-book.com

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版



机械工业出版社微信公众号

上架指导 交通运输 / 汽车技术

ISBN 978-7-111-55505-6

策划编辑◎连景岩 杜凡如 / 封面设计◎鞠杨

营销编辑◎张萍 张彩峰

ISBN 978-7-111-55505-6



9 787111 555056 >

定价：139.00元